

MARCIA HELENA MOREIRA PAIVA

**APLICAÇÃO DE SISTEMAS BASEADOS EM REGRAS *FUZZY* PARA O
ROTEAMENTO EM REDES ÓPTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

Co-orientador: Prof. Dr. Elias Silva de Oliveira

VITÓRIA

2008

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

P149a Paiva, Marcia Helena Moreira, 1982-
Aplicação de sistemas baseados em regras fuzzy para o roteamento
em redes ópticas / Marcia Helena Moreira Paiva. – 2008.
70 f. : il.

Orientador: Marcelo Eduardo Vieira Segatto.

Co-Orientador: Elias Silva de Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo,
Centro Tecnológico.

1. Telecomunicações. 2. Redes de longa distância (Redes de
computação). 3. Lógica difusa. I. Segatto, Marcelo Eduardo Vieira.
II. Oliveira, Elias Silva de, 1963-. III. Universidade Federal do Espírito
Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

MARCIA HELENA MOREIRA PAIVA

**APLICAÇÃO DE SISTEMAS BASEADOS EM REGRAS *FUZZY* PARA O
ROTEAMENTO EM REDES ÓPTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 20 de agosto de 2008.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Elias Silva de Oliveira
Universidade Federal do Espírito Santo
Co-orientador

Prof. Dr. Moisés Renato Nunes Ribeiro
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Agradecimentos

Aos meus orientadores e professores, pelos ensinamentos.

Aos meus familiares e amigos, pelo apoio.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro.

*When the only tool you have is a hammer,
everything begins to look like a nail.*

Zadeh, 1994

Resumo

Em uma rede óptica transparente sem equipamentos para conversão de comprimentos de onda, o atendimento de uma requisição de conexão entre dois nós exige a determinação de uma entre as possíveis rotas que os interligam e a atribuição de um comprimento de onda específico, em que a informação será transmitida do nó origem ao nó destino. O processo de determinação de uma rota é importante, pois a escolha da rota influencia a eficiência na utilização de recursos e, consequentemente, o desempenho da rede. Nesse processo, geralmente é levado em consideração apenas um critério, quase sempre o número de enlaces das rotas. O uso de critérios adicionais, desde que adequadamente combinados, pode levar a uma melhoria no desempenho da rede. Para combinar critérios no processo de decisão de uma rota, é implementado neste trabalho um sistema baseado em regras *fuzzy*. Os resultados apresentados foram obtidos com um sistema *fuzzy*, que leva em consideração, além do número de enlaces das rotas, a quantidade de comprimentos de onda contínuos disponíveis em cada rota no momento em que ocorre uma requisição de conexão. É feita uma análise de desempenho de duas redes com topologias distintas: uma rede em malha regular com 16 nós e 32 enlaces e uma rede em malha irregular com 14 nós e 20 enlaces. Os parâmetros adotados nesta análise são a probabilidade de bloqueio de requisições de conexão e a utilização de recursos da rede.

Abstract

In an optical network without wavelength conversion, a connection between two nodes depends on the determination of the possible routes and the available wavelengths. The route selection is an important issue since it has a great influence in the use of resources, and consequently the network performance. Generally only the number of hops has been used as a criterion to choose a route. However, the use of additional criteria, provided they are properly combined, can lead to an improvement of the network performance. In this work we have investigated the use of fuzzy logic in the routing process of optical networks. A discrete-event simulator was used to analyse the performance of optical networks using a rule-based fuzzy system combining the number of hops and the number of available wavelength during a connection request. We have analysed two different network topologies: a mesh torus regular network with 16 nodes and 32 bidirectional links and a mesh irregular network with 14 nodes and 20 bidirectional links. Blocking probability and network resource utilization were used as metrics to our analyses.

Resumo

En travideblaj optikaj retoj kiuj ne havas aparatojn por konverti ond-longecojn, la kontentigo de konektaĵaj petoj inter du nodoj postulas la determinon de unu el siaj eblaj vojiroj kiuj konektas ilin kaj la determinon de unu specifa ond-longeco, per kio la informo estos transsendita el la origina nodo al la distina nodo. La procedo kiu determinas vojiron estas grava ĉar la vojira elekto influas la efikecon de la uzado de la rimedoj kaj sekve la retan efikecon. En ĉi tiu procedo, ĝenerale oni konsideras nur unu kriterion, preskaŭ ĉiam la nombron da ligiloj en la vojiro. La uzado de pliaj kriterioj, se bone kombinitaj, povas plibonigi la retan efikecon. Por kombini kriteriojn en la procedo kiu elektas la vojiron, oni uzas en ĉi tiu laboro sistemon bazita sur fuzzy-aj reguloj. La prezentitaj rezultoj estis akiritaj per fuzzy-a sistemo kiu konsideras krom la nombron da ligiloj en la vojiro, la kvanton da daŭrantaj ond-longecoj kiuj estas disponeblaj en ĉiu vojiro kiam okazas konektaĵaj petoj. Oni faras analizon pri la funkciado de du retoj kiuj havas malsimilajn topologiojn: unu regula maŝreto kun 16 nodoj kaj 32 ligiloj, kaj unu neregula maŝreto kun 14 nodoj kaj 20 ligiloj. La parametroj adoptitaj en ĉi tiu analizo estas la blokaĵa probableco pri konektaĵaj petoj kaj la uzado de la rimedoj en la reto.

Lista de Figuras

1	Topologias de rede: anel, malha, estrela e barramento.	12
2	Uma rede em malha R com 6 nós e 8 enlaces. Como estabelecer uma comunicação entre os nós 1 e 3?	12
3	Duas possíveis rotas A e B para conectar os nós 1 e 3 da rede R	13
4	Em uma rede óptica sem conversores de comprimentos de onda, a fim de estabelecer uma comunicação entre os nós 1 e 3, fixada a rota A , ainda é necessário encontrar um comprimento de onda disponível simultaneamente nos dois enlaces.	14
5	Um conjunto clássico <i>distância pequena</i>	27
6	Um conjunto <i>fuzzy distância pequena</i>	28
7	Funções de pertinência usuais: (a) trapezoidal, (b) triangular e (c) gaussiana.	30
8	Complementar de um conjunto <i>fuzzy</i>	31
9	Operações com conjuntos <i>fuzzy</i> : (a) união e (b) interseção.	31
10	Região, no plano cartesiano, onde se aplicam os conectivos lógicos <i>fuzzy</i>	32
11	Variável linguística <i>distância</i>	34
12	Esquema de um SBRF.	34
13	Modelo de Mamdani.	37
14	Modelo de Takagi-Sugeno.	37
15	Diagrama de blocos simplificado do simulador.	41
16	Variável linguística de entrada: ocupação da rota. $N\lambda$ representa o número de comprimentos de onda por enlace da rede.	43
17	Variável linguística de entrada: número de enlaces. A variável H representa o número de enlaces da maior rota.	44
18	Variável linguística de saída: custo da rota.	45

19	Superfície representando o custo da rota gerado pelo SBRF, variando-se o número de enlaces e a ocupação da rota.	46
20	Redes simuladas: (a) rede em malha regular com 16 nós e 32 enlaces e (b) rede em malha irregular com 14 nós e 20 enlaces. Todos os enlaces são bidirecionais.	49
21	Rede de 16 nós e 32 enlaces bidirecionais.	53
22	Probabilidade de bloqueio na rede regular de 16 nós - até 20%.	53
23	Probabilidade de bloqueio na rede regular de 16 nós - curva completa.	54
24	Distribuição das requisições para a rede regular de 16 nós, com $k = 5$	55
25	Distribuição das requisições bloqueadas para a rede regular de 16 nós, com $k = 5$	56
26	Rede de 14 nós e 20 enlaces bidirecionais.	57
27	Probabilidade de bloqueio na rede irregular de 14 nós - até 20%.	57
28	Probabilidade de bloqueio na rede irregular de 14 nós - curva completa.	58
29	Distribuição das requisições para a rede irregular de 14 nós, com $k = 5$	59
30	Distribuição das requisições bloqueadas para a rede irregular de 14 nós, com $k = 5$	60

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Trabalhos relacionados	15
1.2	Delimitação do tema	17
1.3	Objetivos	17
1.4	Organização da dissertação	17
2	Redes ópticas	19
2.1	Algoritmos RWA	20
2.1.1	Escolha da rota	20
2.1.2	Alocação do comprimento de onda	23
2.1.3	Seleção conjunta de rota e comprimento de onda	25
3	Sistemas baseados em regras <i>fuzzy</i>	26
3.1	Conceitos básicos	26
3.1.1	Conjuntos <i>fuzzy</i>	28
3.1.2	Operações com conjuntos <i>fuzzy</i>	30
3.1.3	Conectivos lógicos <i>fuzzy</i>	32
3.1.4	Variáveis linguísticas	33
3.2	Sistemas baseados em regras <i>fuzzy</i>	34
4	O algoritmo de roteamento implementado	38
4.1	O simulador de eventos discretos para redes ópticas	40
4.2	Descrição do sistema <i>fuzzy</i> implementado	42

4.3	Roteamento com o sistema <i>fuzzy</i>	47
5	Resultados	49
5.1	Rede em malha regular	52
5.2	Rede em malha irregular	56
5.3	Análise dos resultados	60
5.4	Questões adicionais	61
5.4.1	Critério para a construção da tabela de roteamento	61
5.4.2	Variação dos critérios para escolha da rota no sistema <i>fuzzy</i>	62
5.4.3	Variação dos parâmetros do SBRF	62
5.4.4	Variação das estatísticas de geração das requisições de conexão	62
5.4.5	Uso total dos enlaces	63
5.4.6	Probabilidade de bloqueio para rotas com muitos enlaces	63
6	Conclusões e trabalhos futuros	64
	Publicações	66
	Referências	67

1 Introdução

Uma rede qualquer de telecomunicações é composta de nós interligados por enlaces. A configuração destas interligações é representada pela topologia da rede. Existem algumas topologias comuns, como as exibidas na figura 1: anel, malha, estrela e barramento.

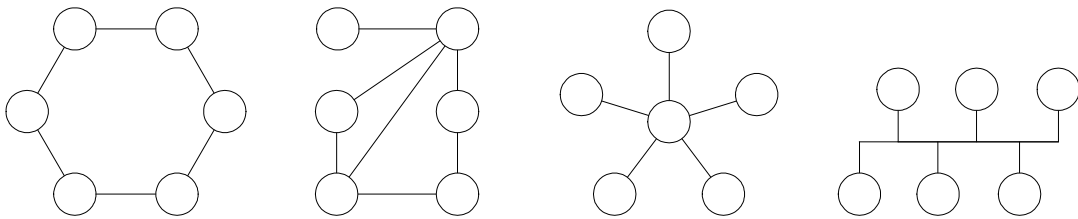


Figura 1: Topologias de rede: anel, malha, estrela e barramento.

Quando é necessário transmitir uma informação de um nó para outro da rede, ocorre uma requisição de conexão. Por exemplo, há uma requisição de conexão quando o nó 1 deseja se comunicar com o nó 3 na rede *R* ilustrada na figura 2. Nesse caso, o nó 1 é chamado nó origem, e o nó 3 é chamado nó destino.

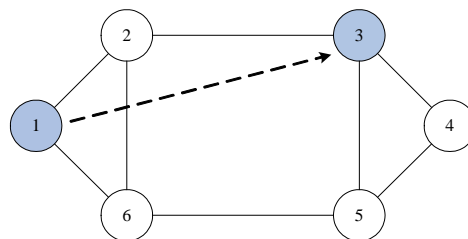


Figura 2: Uma rede em malha *R* com 6 nós e 8 enlaces. Como estabelecer uma comunicação entre os nós 1 e 3?

A comunicação entre dois nós é estabelecida por um caminho ou rota. Em uma rede em malha, geralmente existem diversas rotas para cada par origem-destino. Nesse caso, é necessário decidir que rota utilizar, com base em um ou mais critérios. Este é o chamado problema de roteamento. A figura 3 mostra duas possíveis rotas *A* e *B* para conectar os nós 1 e 3 da rede *R*,

sendo a rota *A* composta por dois enlaces: o primeiro entre os nós 1 e 2, e o segundo entre os nós 2 e 3; e a rota *B* composta por três enlaces interligando os nós 1-6, 6-5 e 5-3.*

O problema de roteamento constitui parte fundamental do projeto de uma rede de telecomunicações. Esse problema é importante, pois a escolha da rota afeta diretamente o desempenho da rede. No caso de uma rede orientada a conexão, utiliza-se como medida de desempenho a probabilidade de bloqueio de requisições de conexão (CAMPELO, 2006).

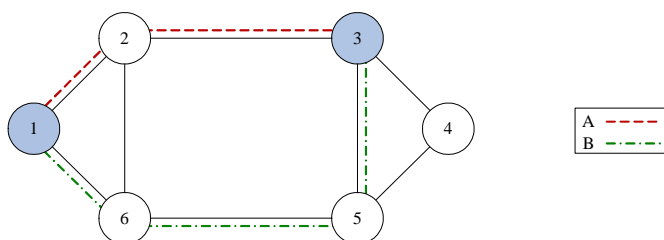


Figura 3: Duas possíveis rotas *A* e *B* para conectar os nós 1 e 3 da rede *R*.

Uma requisição de conexão entre um determinado par de nós é bloqueada ou perdida se, no momento em que ela ocorre, não há recursos disponíveis na rota correspondente. Quando há recursos, a requisição é atendida.

Em uma rede óptica, o recurso necessário para estabelecer uma conexão é a disponibilidade de algum comprimento de onda ao longo de uma determinada rota. Mais ainda, em uma rede óptica desprovida de equipamentos conversores de comprimentos de onda, como é assumido neste trabalho, é necessário um comprimento de onda simultaneamente disponível em todos os enlaces da rota.

Portanto, em uma rede óptica sem conversores de comprimento de onda, o problema de roteamento apresenta um grau de complexidade elevado. Como ilustrado na figura 4, para estabelecer uma comunicação entre dois nós, além de determinar um caminho, deve-se verificar se há nele um comprimento de onda contínuo disponível.

No método de roteamento mais simples de ser implementado, chamado roteamento fixo (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000), é determinada previamente apenas uma rota para estabelecer a conexão entre cada par origem-destino da rede. Assim, no momento em que ocorre uma requisição, se existe um comprimento de onda disponível nesta única rota, a requisição é atendida; caso contrário, ela é bloqueada.

*A definição adotada para número de enlaces neste trabalho desconsidera redes multifibras, onde há múltiplos enlaces interligando um mesmo par de nós. Usualmente, diz-se número de saltos, do inglês *hops*. Porém, essa terminologia foi evitada devido à ambiguidade provocada pelos diferentes significados da palavra saltos frequentemente utilizados na literatura.

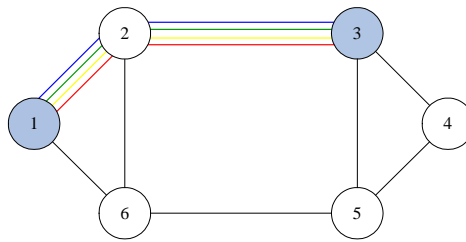


Figura 4: Em uma rede óptica sem conversores de comprimentos de onda, a fim de estabelecer uma comunicação entre os nós 1 e 3, fixada a rota A, ainda é necessário encontrar um comprimento de onda disponível simultaneamente nos dois enlaces.

O roteamento fixo apresenta uma taxa de bloqueio elevada em comparação a outros métodos de roteamento, em função da indisponibilidade de recursos e de eventuais falhas em enlaces, que podem comprometer a rota pré-determinada.

Isto motiva a utilização de outros métodos, como o roteamento fixo alternativo (MURTHY; GURUSAMY, 2002), por exemplo, que consideram mais de uma rota para cada par origem-destino da rede.

Contudo, no instante de uma requisição, se há mais de uma rota, torna-se necessário efetuar uma escolha, e essa é uma questão essencial. Rotas diferentes podem ocupar quantidades diferentes de recursos da rede para atender a uma mesma requisição de conexão. Por isso, a escolha da rota influencia na aceitação ou rejeição de novas requisições e, conseqüentemente, na probabilidade de bloqueio da rede.

De um modo geral, a escolha da rota para atender a uma requisição de conexão é feita utilizando-se apenas *um* critério, comumente o número de enlaces da rota, ou a distância, ou atraso de propagação, entre os nós origem-destino (MURTHY; GURUSAMY, 2002). Outros critérios que poderiam ser considerados nesta escolha são, por exemplo: o número de comprimentos de onda disponíveis na rota, no momento da requisição; e a duração da requisição.

A utilização de critérios adicionais, especialmente dos que variam em função do estado da rede, pode levar a uma escolha mais apropriada, e, a longo prazo, melhorar o desempenho da rede, possibilitando o atendimento de mais requisições de conexão com a mesma quantidade de recursos. Mas isso depende do modo como os critérios são combinados.

Suponha, por exemplo, uma rede com N nós, L enlaces e 8 comprimentos de onda por enlace. Se existem duas rotas para atender a uma determinada requisição: uma com 2 enlaces e 2 comprimentos de onda disponíveis, e outra com 3 enlaces e 7 comprimentos de onda disponíveis, qual delas escolher?

É possível elaborar uma função que relacione os critérios adotados e usá-la para efetuar a escolha da rota. Por exemplo, pode-se considerar uma combinação linear, em que as variáveis representam os critérios, e os coeficientes indicam a relevância de cada critério para a escolha. Nesse caso, o problema reside em atribuir adequadamente os coeficientes para cada rede.

Entretanto, também é possível usar regras expressas em linguagem corrente no processo de decisão da rota. Isso é feito por meio de um Sistema Baseado em Regras *Fuzzy* (SBRF). Neste trabalho, é investigado se um SBRF aplicado ao problema de roteamento em redes ópticas gera bons resultados.

Um sistema baseado em regras *fuzzy* é uma ferramenta matemática desenvolvida a partir de conceitos da lógica *fuzzy*, introduzida pelo professor e pesquisador Lotfi Asker Zadeh, em 1965 (ZADEH, 2008).^{*} As regras *fuzzy*, escritas em termos de variáveis linguísticas, permitem a aplicação do conhecimento humano de maneira simples e formam a base do cálculo com palavras (ZADEH, 1999).

As primeiras aplicações da lógica *fuzzy* surgiram na área de controle automático, em 1975, com trabalhos de E. H. Mamdani e S. Assilian (ABRAMOVITCH; BUSHNELL, 1999). Atualmente, encontram-se aplicações de ferramentas desenvolvidas com o uso da lógica *fuzzy* em diversas áreas, como engenharia, economia, medicina e educação, por exemplo. A indústria também já utiliza sistemas de controle baseados na lógica *fuzzy* em diversos produtos**, como em máquinas de lavar, filmadoras, fornos de microondas etc.

Na área de telecomunicações existem aplicações dessas ferramentas, por exemplo, para melhoria da qualidade de serviço em redes (RAZAVI et al., 2008; RESENDE, 2006; FERNANDEZ; PEDROZA; REZENDE, 2003). Algoritmos desenvolvidos com a teoria de grafos *fuzzy* também podem ser aplicados em telecomunicações. Há trabalhos recentes que usam parâmetros *fuzzy* para a determinação do menor caminho entre dois vértices de um grafo, ou no caso, nós de uma rede (HERNANDES et al., 2007; OKADA, 2004).

A seguir, são comentados alguns trabalhos que utilizam sistemas *fuzzy* especificamente para o problema de roteamento em redes ópticas.

^{*}Por seu pioneirismo nesta área, Zadeh recebeu, entre outras dezenas de prêmios, a medalha de honra do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) em 1995.

Fonte: <http://www.ieee.org/portal/pages/about/awards/pr/mohpr.html>. Acesso em: 21/07/2008.

^{**}Fonte: We all have a duty of leaving our ideas behind - A conversation with creator of fuzzy logic Lotfi Zadeh. *Journal of automation, mobile robotics & intelligent systems*, v. 1, n. 4, p. 70-72, 2007.

1.1 Trabalhos relacionados

Sardar e outros (SARDAR et al., 2004) apresentam um sistema baseado em regras *fuzzy* para a escolha da rota em uma rede óptica. No esquema proposto por eles, são encontrados previamente os 3 menores caminhos entre cada par origem-destino da rede, de acordo com o critério de número de enlaces ou a distância entre os nós. Isso é feito com o algoritmo fixo alternativo.

No momento em que ocorre uma requisição de conexão, uma mensagem de controle é enviada do nó origem ao nó destino pelas 3 rotas, a fim de coletar informações sobre a disponibilidade dos comprimentos de onda em cada uma delas.

No nó destino, o sistema *fuzzy* escolhe que caminho utilizar, com base em dois critérios: o número de comprimentos de onda livres e o atraso total para processar a mensagem de controle.

Em uma rede de 6 nós, 8 enlaces e 8 comprimentos de onda por enlace, a probabilidade de bloqueio obtida com esse sistema é aproximadamente 55% menor que a obtida com o roteamento fixo alternativo. Contudo, não foram realizadas simulações com outras redes.

Outra referência importante para esta dissertação é a tese de doutorado de Djuana Pigford Lea (LEA, 2004), em que a autora implementa quatro métodos para o roteamento, a saber: algoritmos genéticos, SBRF, *simulated annealing* e busca tabu. Os resultados de probabilidade de bloqueio obtidos por cada um destes métodos são comparados aos resultados obtidos pelo roteamento fixo alternativo, considerando-se 3 rotas possíveis.

No roteamento feito com o SBRF, consideram-se 5 rotas possíveis para cada par origem-destino da rede. Quando ocorre uma requisição de conexão, é chamado o sistema *fuzzy* para calcular um índice de qualidade para cada rota. São utilizados como entrada o número de enlaces da rota e o número de comprimentos de onda disponíveis na mesma. A requisição é atendida pela rota que apresentar o maior índice.

Foram simuladas uma rede com 14 nós e 20 enlaces e outra com 16 nós e 32 enlaces, sendo considerados 4 e 8 comprimentos de onda por enlace. Especificamente para essas redes e determinadas condições de carga, o SBRF obteve os melhores resultados de probabilidade de bloqueio na maioria dos casos. Entretanto, para cada simulação é apresentado apenas um trecho da curva de probabilidade de bloqueio em função da carga da rede, o que gera dúvidas sobre o comportamento da rede com relação aos métodos de roteamento nas outras situações de carga.

Mais recentemente, foi desenvolvido um SBRF para determinar quando um caminho óptico pode ou não ser estabelecido em uma rede óptica com conversores de comprimento de onda

(HWANG; LEE; CHANG, 2006). As variáveis que o sistema *fuzzy* usa na decisão são a carga de tráfego de cada enlace e o número de enlaces da rota.

Simulações foram realizadas com uma rede em malha com 16 nós e 21 enlaces, sendo considerados 8 e 16 comprimentos de onda por enlace. Os resultados mostraram que, especialmente quando a carga de tráfego na rede é alta, o algoritmo proposto apresenta melhor desempenho, quando comparado a um método de roteamento baseado apenas no número de enlaces das rotas. O desempenho foi medido por três fatores: quantidade de conexões sucessivas, probabilidade de bloqueio e taxa de utilização do canal.

1.2 Delimitação do tema

Neste trabalho, é considerado o problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda em uma rede óptica com N nós, L enlaces e W comprimentos de onda por enlace, em que as requisições de conexão chegam aleatoriamente a um sistema de controle centralizado. Ainda é assumido que a rede não possui conversores de comprimento de onda. Nesse contexto, interessam, particularmente, os algoritmos para escolha da rota. A aplicação de sistemas baseados em regras *fuzzy* também constitui assunto principal desta dissertação.

1.3 Objetivos

São objetivos gerais deste trabalho o estudo de redes ópticas e seus principais algoritmos de roteamento e alocação de comprimentos de onda e a implementação de sistemas baseados em regras *fuzzy* para o roteamento em tais redes. Especificamente, pretende-se investigar se/quando um SBRF gera bons resultados, quando aplicado ao processo de decisão da rota em uma rede óptica.

Esses objetivos são atingidos com: (i) a implementação de um SBRF; (ii) o desenvolvimento de um algoritmo de roteamento, que toma a decisão da rota a partir do SBRF implementado; e (iii) a avaliação do desempenho de duas redes, obtido com o algoritmo implementado e com os métodos de roteamento estáticos fixo e fixo alternativo.

1.4 Organização da dissertação

Os próximos capítulos introduzem conceitos fundamentais sobre os dois principais temas abordados neste trabalho. O capítulo 2 trata de redes ópticas, com enfoque nos algoritmos de

roteamento e alocação de comprimentos de onda. Os sistemas baseados em regras *fuzzy* são abordados no capítulo 3.

O capítulo 4 aborda a ferramenta utilizada para dar suporte a este trabalho: um simulador de eventos discretos para redes ópticas; descreve o sistema *fuzzy* implementado; e mostra como o sistema é usado para o roteamento.

Os resultados de simulações feitas com duas redes são apresentados no capítulo 5, e o capítulo 6 traz as conclusões.

2 *Redes ópticas*

Uma rede óptica transparente dotada da tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) é uma rede de telecomunicações de alta capacidade, em que cada enlace pode transmitir dados simultaneamente por diversos canais, usando comprimentos de onda distintos. Além disso, as informações são transmitidas de um nó origem para um nó destino sem a necessidade de converter o sinal do domínio óptico para o domínio elétrico, e vice-versa, nos nós intermediários do caminho. Nesse trabalho, uma rede como essa é referida simplesmente como rede óptica.

Para uma rede óptica com N nós, um caminho físico é definido como um enlace de fibra óptica ligando dois nós quaisquer. O conjunto dos caminhos físicos constitui a topologia física da rede. Um caminho óptico é definido como uma rota interligando dois nós quaisquer da rede sem que haja nenhuma conversão óptica-elétrica-óptica nos nós intermediários. Dependendo das características da rede, é possível que existam vários caminhos ópticos disponíveis para um mesmo par de nós origem-destino. O conjunto dos caminhos ópticos forma a topologia virtual ou topologia lógica da rede (MURTHY; GURUSAMY, 2002).

O projeto de redes ópticas comumente é dividido em dois sub-problemas (MURTHY; GURUSAMY, 2002; RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2001), que em geral são resolvidos separadamente: o projeto da topologia lógica, conhecido como VTD (*Virtual Topology Design*); e o roteamento e a alocação de comprimentos de onda, ou RWA (*Routing and Wavelength Assignment*). Ambos são problemas NP-árduos e podem ser resolvidos com o auxílio de técnicas de programação inteira mista ou utilizando heurísticas (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2001). A seguir, é feita uma breve descrição dos dois sub-problemas.

O objetivo principal do VTD é, dados uma matriz de demanda de tráfego estática entre os nós da rede e um conjunto de restrições quaisquer, determinar um conjunto de caminhos ópticos que possibilitem que o roteamento de tráfego seja feito de forma a otimizar uma determinada métrica, como por exemplo, o processamento de tráfego na rede (ALMEIDA et al., 2006), ou o congestionamento (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2001), definido como o máximo tráfego,

proveniente de todos os pares origem-destino, roteado sobre qualquer dos enlaces da rede.

O RWA também é geralmente dividido em dois subproblemas: (i) o roteamento, que tem como objetivo determinar uma rota ligando o par origem-destino; e (ii) a alocação de comprimentos de onda, cujo objetivo é atribuir à rota um comprimento de onda disponível, a fim de estabelecer uma conexão requerida.

Para essa atribuição, quando a rede não possui conversores de comprimento de onda, é necessário que o mesmo comprimento de onda esteja disponível em todos os enlaces que compõem a rota, o que é chamado de restrição de continuidade de comprimento de onda.

Para o problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda, geralmente são usados algoritmos distintos, um após o outro, para a escolha da rota e do comprimento de onda (MURTHY; GURUSAMY, 2002). Também é possível efetuar as escolhas simultaneamente, porém com um custo computacional maior. Os principais algoritmos apresentados na literatura são descritos e discutidos na seção 2.1.

2.1 Algoritmos RWA

2.1.1 Escolha da rota

Os algoritmos de roteamento podem ou não levar em consideração o estado atual da rede ao efetuarem suas escolhas, sendo por este aspecto denominados adaptativos e estáticos, respectivamente (LEA, 2004). O desempenho da rede geralmente é melhor, com relação à probabilidade de bloqueio, quando essas informações são consideradas na escolha da rota. Porém, isso ocorre às custas de um maior esforço computacional.

Os algoritmos de roteamento estáticos consideram tabelas de roteamento geradas *off-line*, que armazenam as rotas para cada par origem-destino da rede. De um modo geral, são encontradas as rotas de menor custo relativamente a algum critério pré-estabelecido, por meio de algoritmos como o de Dijkstra (CORMEN et al., 2002). Os critérios de custo comumente adotados são o número de enlaces da rota e o atraso de propagação, ou distância entre os nós. Enquadram-se no caso estático os seguintes métodos: roteamento fixo, roteamento fixo alternativo, e roteamento exaustivo (MURTHY; GURUSAMY, 2002); apresentados, respectivamente, nos algoritmos 1, 2 e 3.

Para o roteamento exaustivo, são encontradas previamente e armazenadas todas as possíveis rotas para cada par de nós origem-destino da rede. No roteamento fixo alternativo, a busca é limitada a um número k de rotas possíveis, denominadas rotas alternativas. O caso particular

quando $k = 1$ é denominado roteamento fixo. Dentre esses, o roteamento fixo é o mais simples de ser implementado, e o que apresenta pior desempenho com relação à probabilidade de bloqueio. O melhor desempenho seria obtido com o roteamento exaustivo, mas a busca exaustiva pode tornar o algoritmo muito lento. O roteamento fixo alternativo apresenta custo de implementação e desempenho intermediários.

Algoritmo 1 Roteamento fixo

Entrada: A rota r de menor custo para um determinado par de nós origem-destino da rede.

Saída: A rota r , ou nulo, caso não exista nenhum comprimento de onda disponível em todos os enlaces da rota r .

- 1: Início
 - 2: Chame um algoritmo de atribuição de comprimento de onda, que retorna λ
 - 3: Se $\lambda = \emptyset$, então $r \leftarrow \emptyset$
 - 4: Fim
-

Algoritmo 2 Roteamento fixo alternativo

Entrada: As k rotas de menor custo para um determinado par de nós origem-destino da rede, ordenadas em uma tabela T .

Saída: Uma rota r , ou nulo, caso não exista nenhum comprimento de onda disponível em todos os enlaces de alguma das rotas de T .

- 1: Início
 - 2: $r \leftarrow \emptyset$
 - 3: Para cada rota r_i da tabela T
 - 4: Chame um algoritmo de atribuição de comprimento de onda, que retorna λ
 - 5: Se $\lambda \neq \emptyset$, então
 - 6: $r \leftarrow r_i$
 - 7: Fim Para
 - 8: Fim Se
 - 9: Fim Para
 - 10: Fim
-

Nos algoritmos de roteamento adaptativos, como o *least-congested-path routing*, o processo de escolha da rota leva em consideração as outras requisições que ocorrem simultaneamente na rede. O *least-congested-path routing* (algoritmo 4) pode ser visto como uma extensão do roteamento fixo alternativo. É calculada a ocupação de cada rota da tabela relativa ao par origem-destino, e escolhida a rota com a menor ocupação, ou seja, a rota com mais comprimentos de onda contínuos disponíveis. O custo computacional deste algoritmo é mais alto em comparação aos algoritmos de roteamento estáticos, pois o processo de escolha da rota exige o exame de todos os enlaces de todas as rotas candidatas (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000).

Algoritmo 3 Roteamento exaustivo

Entrada: Todas as rotas possíveis para um determinado par de nós origem-destino da rede, ordenadas de acordo com o custo em uma tabela T .

Saída: Uma rota r , ou nulo, caso não exista nenhum comprimento de onda disponível em todos os enlaces de alguma das rotas de T .

```

1: Início
2:    $r \leftarrow \emptyset$ 
3:   Para cada rota  $r_i$  da tabela  $T$ 
4:     Chame um algoritmo de atribuição de comprimento de onda, que retorna  $\lambda$ 
5:     Se  $\lambda \neq \emptyset$ , então
6:        $r \leftarrow r_i$ 
7:     Fim Para
8:   Fim Se
9: Fim Para
10: Fim

```

Algoritmo 4 *Least-congested-path routing*

Entrada: As k rotas de menor custo para um determinado par de nós origem-destino da rede, ordenadas em uma tabela T .

Saída: Uma rota r , ou nulo, caso não exista nenhum comprimento de onda disponível em todos os enlaces de alguma das rotas de T .

```

1: Início
2:    $r \leftarrow \emptyset$ 
3:   Para cada rota  $r_i$  da tabela  $T$ 
4:     Calcule a ocupação de  $r_i$ 
5:     Se a rota  $r_i$  não está totalmente ocupada, então, armazene-a em uma tabela  $T'$ , por
       ordem de ocupação
6:   Fim Para
7:   Se a tabela  $T'$  não está vazia, então, escolha sua primeira rota  $r$ 
8: Fim

```

2.1.2 Alocação do comprimento de onda

Uma vez determinada a rota, utiliza-se um algoritmo para escolher o comprimento de onda que será alocado à requisição. Para essa etapa, destacam-se os seguintes algoritmos: First-fit, Aleatório, Least-used e Most-used.

A política First-fit para atribuição de comprimento de onda é apresentada no algoritmo 5. Inicialmente, é atribuído um índice a cada comprimento de onda, e definida uma ordem para a busca. A cada requisição de conexão, é percorrida a lista de comprimentos de onda, na ordem estabelecida, até que seja encontrado um comprimento de onda disponível na rota fixada, ou até o fim da lista. Esse algoritmo é muito utilizado, devido à eficiência e à simplicidade de sua implementação.

Algoritmo 5 First-fit

Entrada: Uma rota r e uma lista L com os comprimentos de onda em uma certa ordem.

Saída: Um comprimento de onda λ disponível na rota r , ou nulo, caso nenhum esteja disponível em todos os enlaces de r .

```

1: Início
2:    $\lambda \leftarrow \emptyset$ 
3:   Para cada comprimento de onda  $\lambda_i$  da lista  $L$ 
4:     Se  $\lambda_i$  está disponível em todos os enlaces de  $r$ , então
5:        $\lambda \leftarrow \lambda_i$ 
6:     Fim Para
7:   Fim Se
8: Fim Para
9: Fim
  
```

O algoritmo 6 apresenta o método Aleatório para a alocação de comprimentos de onda. A cada requisição de conexão é necessário percorrer toda a lista de comprimentos de onda, verificando a disponibilidade de cada um na rota fixada. Dentre os comprimentos de onda disponíveis, ocorre um sorteio para determinar aquele que atenderá a requisição. Exceto para as requisições bloqueadas, quando toda a lista de comprimentos de onda é percorrida, esse algoritmo realiza mais operações que o First-fit para efetuar sua escolha. Isso pode se tornar uma desvantagem, especialmente nos casos em que há muitos comprimentos de onda por enlace.

Nos algoritmos Least-used e Most-used, apresentados em conjunto no algoritmo 7, os comprimentos de onda disponíveis são ordenados de acordo com o uso. No algoritmo Most-used, a lista de comprimentos de onda é percorrida em ordem decrescente, e o comprimento de onda escolhido é o mais usado, ou seja, o que é usado no maior número de enlaces da rede no momento

em que ocorre a requisição de conexão. O comprimento de onda menos usado é o preferido do algoritmo Least-used.

O algoritmo Most-used tenta agrupar as requisições em menos comprimentos de onda, enquanto o Least-used tenta distribuir igualmente as requisições sobre todos os comprimentos de onda (LEA, 2004). Dessa forma, ambos requerem informação global sobre o estado da rede, ao contrário dos algoritmos First-fit e Aleatório, e têm custo computacional mais elevado. Segundo Zang (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000), o desempenho do algoritmo Most-used é significativamente melhor do que o do Least-used, que por sua vez, é pior do que o do algoritmo Aleatório.

Algoritmo 6 Aleatório

Entrada: Uma rota r e uma lista L com os comprimentos de onda em uma certa ordem.

Saída: Um comprimento de onda λ disponível na rota r , ou nulo, caso nenhum esteja disponível em todos os enlaces de r .

- 1: Início
 - 2: $\lambda \leftarrow \emptyset$
 - 3: Para cada comprimento de onda λ_i da lista L
 - 4: Se λ_i está disponível em todos os enlaces de r , então armazene-o em uma lista L'
 - 5: Fim Para
 - 6: Se a lista L' não está vazia, então, sorteie a partir dela um comprimento de onda λ
 - 7: Fim
-

Algoritmo 7 Least-used/Most-used

Entrada: Uma rota r e uma lista L com os comprimentos de onda em ordem crescente/decrescente de uso.

Saída: Um comprimento de onda λ disponível na rota r , ou nulo, caso nenhum esteja disponível em todos os enlaces de r .

- 1: Início
 - 2: $\lambda \leftarrow \emptyset$
 - 3: Para cada comprimento de onda λ_i da lista L
 - 4: Se λ_i está disponível em todos os enlaces de r , então
 - 5: $\lambda \leftarrow \lambda_i$
 - 6: Fim Para
 - 7: Fim Se
 - 8: Fim Para
 - 9: Fim
-

2.1.3 Seleção conjunta de rota e comprimento de onda

Também é possível efetuar simultaneamente a escolha da rota e do comprimento de onda. Isso é feito pelo método *joint wavelength-route selection* (MURTHY; GURUSAMY, 2002) conforme apresenta o algoritmo 8. É atribuído um custo a cada par rota/comprimento de onda, com base em fatores como por exemplo: o estado de uso dos comprimentos de onda, o número de enlaces da rota, e o número de comprimentos de onda disponíveis na rota. O par que apresenta o menor custo é então escolhido para atender a requisição. A principal desvantagem deste método é o elevado custo computacional, especialmente quando o número de nós da rede ou o número de comprimentos de onda por enlace é muito grande.

Algoritmo 8 *Joint wavelength-route selection*

Entrada: Uma tabela T com todas as rotas possíveis para um determinado par de nós origem-destino da rede e uma lista L com os comprimentos de onda em uma certa ordem.

Saída: Uma rota r em que há um comprimento de onda λ disponível, ou nulo, caso não exista em nenhuma das rotas de T algum comprimento de onda disponível.

```

1: Início
2:   Para cada rota  $r_i$  da tabela  $T$ 
3:     Para cada comprimento de onda  $\lambda_j$  da lista  $L$ 
4:       Se  $\lambda_j$  está ocupado em algum dos enlaces de  $r_i$ , então
5:          $r \leftarrow \emptyset$ 
6:          $\lambda \leftarrow \emptyset$ 
7:       Fim Para
8:     Senão
9:       Calcule o custo do par  $(r_i, \lambda_j)$ 
10:      Armazene o par  $(r_i, \lambda_j)$  em uma tabela  $T'$ , por ordem de custo
11:    Fim Se
12:    Se a tabela  $T'$  não está vazia, então, escolha seu primeiro par  $(r, \lambda)$ 
13:  Fim Para
14: Fim Para
15: Fim

```

3 *Sistemas baseados em regras fuzzy*

O principal objetivo deste capítulo é explicar o modo de funcionamento de um sistema baseado em regras *fuzzy*. Para isso, são introduzidos na primeira seção alguns conceitos fundamentais da lógica e teoria dos conjuntos *fuzzy*: conjuntos, operações com conjuntos, e conectivos lógicos. Para maior clareza, são colocados paralelamente os conceitos correspondentes na lógica e teoria clássica dos conjuntos.

Ainda na seção 3.1, define-se variável linguística, que é um termo próprio da matemática *fuzzy*. São as variáveis linguísticas que possibilitam a determinação de regras expressas em linguagem corrente, para relacionar as entradas e saídas de um sistema. Todos os conceitos introduzidos são essenciais para a compreensão dos sistemas baseados em regras *fuzzy*, abordados na seção 3.2.

3.1 Conceitos básicos

Na teoria clássica dos conjuntos, dado um conjunto universo U , um conjunto A em U é completamente identificado por uma função característica $\mu_A(x) : U \rightarrow \{0, 1\}$, que associa a cada elemento $x \in A$: o número 1, caso o elemento x pertença ao conjunto A , ou o número 0, caso contrário (HALMOS, 2001). A identificação é dita completa, pois, nesta teoria, não há sequer uma terceira possibilidade: ou um elemento pertence a um conjunto, ou ele não pertence, exclusivamente.

Como ilustração, seja $U = [0, 100]$ um conjunto universo representando as possíveis distâncias entre dois nós de uma rede, por exemplo, em alguma unidade de medida qualquer. Assumindo que distâncias podem ser classificadas, na linguagem corrente, como pequenas, médias e grandes, considere o problema de determinar um conjunto para representar o conceito *distância pequena*.

Isto pode ser feito por meio de um conjunto A com a seguinte função característica:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & , 0 \leq x \leq 30 \\ 0 & , 30 < x \leq 100 \end{cases} , \quad (3.1)$$

representada na figura 5.

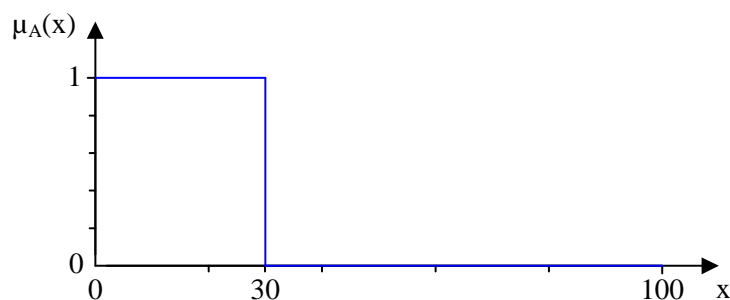


Figura 5: Um conjunto clássico *distância pequena*.

Segundo essa função, a distância entre dois nós é pequena, estritamente se ela é dada por um número real pertencente ao intervalo fechado $[0, 30]$. Consequentemente, uma ligeira variação em torno de 30 provoca uma mudança drástica no comportamento da função. Qualquer outro valor limite pode ser escolhido, em substituição ao 30, de acordo com o contexto, mas o estabelecimento de algum limite é essencial, pela natureza monótona da grandeza distância. Além disso, todos os valores entre 0 e 30 estão igualmente relacionados ao conceito *distância pequena*. Assim, por exemplo, se a distância entre um par de nós P_1 é 5 e entre um par P_2 é 25, não cabe nenhuma distinção entre eles por essa função.

De maneira análoga, podem ser definidos conjuntos para expressar os conceitos de distância média e grande. Entretanto, no caso da teoria clássica, os conjuntos *distância pequena*, *distância média* e *distância grande* constituem necessariamente uma partição do conjunto U . Ou seja, a interseção desses conjuntos, dois a dois, deve ser nula, e a união dos três deve resultar no conjunto universo (HALMOS, 2001). Isso acontece porque cada valor de distância $x \in U$ é pequeno, ou médio, ou grande. Não se admite que uma determinada distância seja simultaneamente pequena e média, por exemplo. E também não é permitido que uma certa distância não seja classificada em algum desses termos.

Estas questões decorrem imediatamente de dois axiomas em que se baseia a lógica clássica: (i) o princípio da não contradição, segundo o qual uma proposição não pode ser verdadeira e falsa ao mesmo tempo; e (ii) o princípio do terceiro excluído, que afirma o seguinte: toda proposição ou é verdadeira ou é falsa, verificando-se sempre um desses casos e nunca um terceiro (ALENCAR-FILHO, 2000).

Na lógica clássica, pode-se então associar, a cada proposição, um elemento pertencente ao conjunto finito $\{0, 1\}$, conforme ela seja verdadeira ou falsa. Em contraste, na lógica *fuzzy*, uma proposição pode ser associada a qualquer valor pertencente ao conjunto dos números reais $[0, 1]$. Desse modo, a lógica clássica se torna um caso particular, e um conjunto finito é substituído por um conjunto não-enumerável de possibilidades. A característica mais relevante da lógica *fuzzy* é justamente o fato de que ela admite proposições parcialmente verdadeiras, isto é, verdadeiras com um certo grau. A definição a seguir mostra como um conjunto clássico pode ser visto simplesmente como uma particularidade de um conjunto *fuzzy*.

3.1.1 Conjuntos *fuzzy*

Dado um conjunto universo U , um conjunto *fuzzy* F em U é caracterizado por uma função de pertinência $\mu_F(x) : U \rightarrow [0, 1]$, que associa a cada elemento x de U um número real entre 0 e 1, correspondente ao grau de pertinência de x em F . À medida que $\mu_F(x)$ se aproxima de 1, aumenta o grau de pertinência de x em F (ZADEH, 1965).

Para fazer um paralelo com o exemplo anterior, considere o mesmo conjunto universo $U = [0, 100]$ e o problema de caracterizar o conceito *distância pequena*, dessa vez por meio de um conjunto *fuzzy* F . Uma maneira de se fazer isso é por meio da função de pertinência

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 1 & , 0 \leq x \leq 20 \\ \frac{40-x}{20} & , 20 \leq x \leq 40 \\ 0 & , 40 \leq x \leq 100 \end{cases} \quad (3.2)$$

representada na figura 6. Os elementos x de U pertencentes ao intervalo $[0, 20]$ possuem grau de pertinência pleno com relação ao conjunto *fuzzy distância pequena*. No intervalo $[20, 40]$, a função indica que, quanto maior o número, menor é seu grau de pertinência. E o grau de pertinência dos elementos no intervalo $[40, 100]$ é nulo.

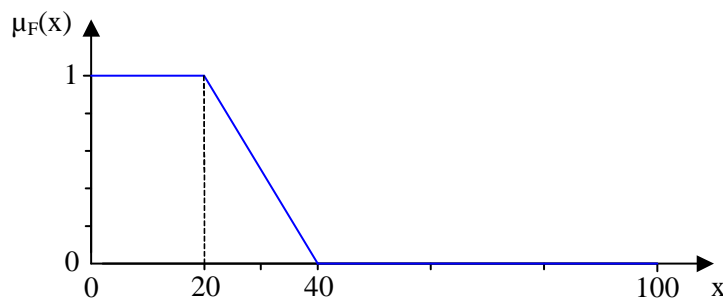


Figura 6: Um conjunto *fuzzy distância pequena*.

Como sugere o senso comum, quanto maior a distância, menos relacionada ela está ao conceito *distância pequena*. E é essa a idéia expressa pela função de pertinência mostrada na equação (3.2). Num universo em que a distância pode variar entre 0 e 100 unidades de medida, considera-se que um valor entre 0 e 20 satisfaz plenamente o conceito *distância pequena*, enquanto valores entre 40 e 100 definitivamente não estão relacionados a este conceito. No intervalo $[20, 40]$, a relação do valor com o conceito *distância pequena* diminui proporcionalmente ao aumento da distância.

Ao permitir que a imagem de um elemento $x \in U$ assumia qualquer valor no intervalo $[0, 1]$, e não apenas no conjunto $\{0, 1\}$, torna-se viável modelar a função de pertinência de modo que não ocorram alterações drásticas no seu comportamento. Isso pode ser observado comparando-se as figuras 5 e 6. A mudança brusca ocorrida em $x = 30$, no conjunto clássico, é substituída por uma transição mais suave, ao longo do intervalo $[20, 40]$, no conjunto *fuzzy*.

Além disso, se a distância entre um par de nós P_1 é 5 e entre um par P_2 é 25, ao aplicar a função de pertinência $\mu_F(x)$, obtém-se: $\mu_F(5) = 1$ e $\mu_F(25) = 0,75$. Desse modo, é possível diferenciar dois elementos, ainda que eles estejam restritos ao conjunto *distância pequena*. E isso não é possível para um conjunto clássico, como visto anteriormente.

As fronteiras dos intervalos usados neste exemplo também são apenas ilustrativas. Estes parâmetros, assim como o formato da curva, podem ser arbitrariamente alterados, a critério de quem define o conjunto, ou de acordo com a necessidade de uma determinada aplicação.

Ainda que, a princípio, seja possível utilizar qualquer função de pertinência para representar conjuntos *fuzzy*, tendo ou não uma expressão matemática que a descreva, na prática, existe uma predileção por certos tipos de função. Os tipos que aparecem com maior frequência nas aplicações podem ser vistos na figura 7.

A função de pertinência trapezoidal, apresentada na figura 7(a), é dada pela equação (3.3). Ela depende de quatro parâmetros a, b, c e d , que devem pertencer ao conjunto universo em questão. A figura 7(b) mostra a função de pertinência triangular, que é apenas um caso particular da trapezoidal, quando $b = c$.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & , a \leq x \leq b \\ 1 & , b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & , c \leq x \leq d \\ 0 & , d \leq x \end{cases} \quad (3.3)$$

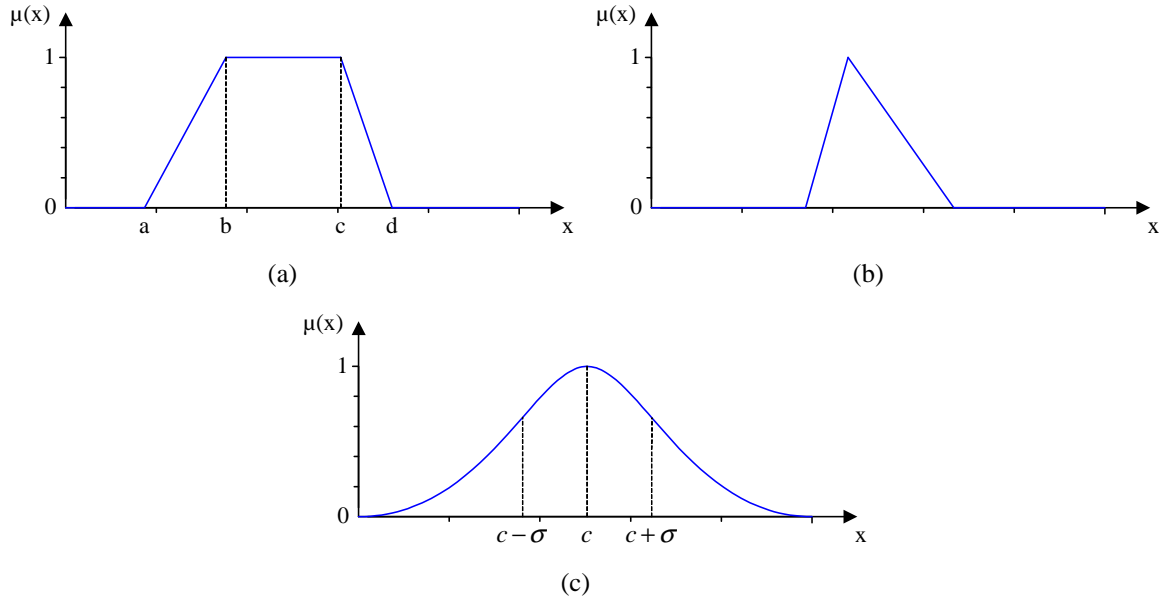


Figura 7: Funções de pertinência usuais: (a) trapezoidal, (b) triangular e (c) gaussiana.

A função de pertinência gaussiana, dada pela equação (3.4), fica inteiramente determinada com dois parâmetros: a média c e o desvio padrão σ . Sua bem conhecida forma é mostrada na figura 7(c).

$$\mu(x) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.4)$$

A simplicidade na implementação, além da facilidade na determinação dos parâmetros, são possíveis razões para a escolha das funções de pertinência consideradas acima, na maioria das aplicações.

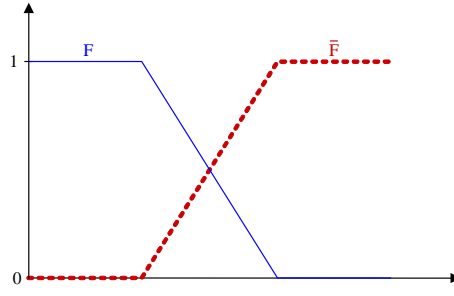
3.1.2 Operações com conjuntos *fuzzy*

A seguir, são definidas as operações básicas com conjuntos *fuzzy*: união, interseção e conjunto complementar (ZADEH, 1965). O conceito de conjunto complementar é ilustrado na figura 8. A figura 9 mostra a união e a interseção de dois conjuntos *fuzzy*.

Se F um conjunto *fuzzy* definido num conjunto universo U , seu complementar \bar{F} é um conjunto *fuzzy* com a seguinte função de pertinência:

$$\mu_{\bar{F}}(x) = 1 - \mu_F(x), \quad x \in U. \quad (3.5)$$

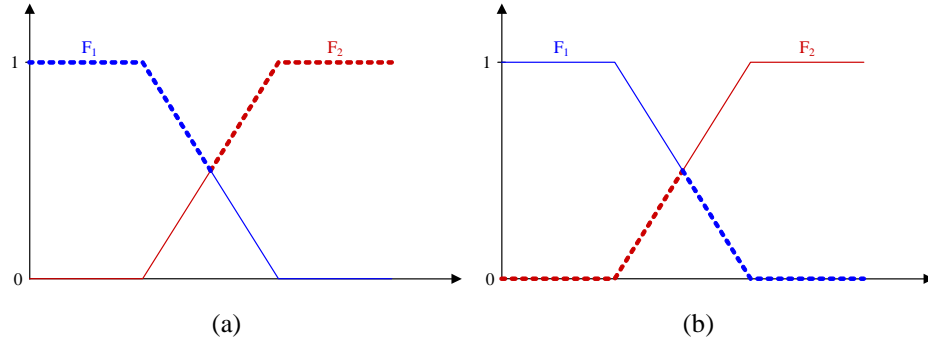
A união $F_1 \cup F_2$ de dois conjuntos *fuzzy* F_1 e F_2 , definidos num conjunto universo U , é um

Figura 8: Complementar de um conjunto *fuzzy*.

conjunto *fuzzy* com função de pertinência dada pela equação (3.6). Por sua vez, a função de pertinência do conjunto *fuzzy* $F_1 \cap F_2$, que representa a interseção entre os mesmos, é mostrada na equação (3.7).

$$\mu_{F_1 \cup F_2}(x) = \max\{\mu_{F_1}(x), \mu_{F_2}(x)\}, x \in U \quad (3.6)$$

$$\mu_{F_1 \cap F_2}(x) = \min\{\mu_{F_1}(x), \mu_{F_2}(x)\}, x \in U \quad (3.7)$$

Figura 9: Operações com conjuntos *fuzzy*: (a) união e (b) interseção.

Deve-se observar que, em particular, se F , F_1 e F_2 forem conjuntos clássicos, as funções características correspondentes aos conjuntos \bar{F} , $F_1 \cup F_2$ e $F_1 \cap F_2$ são exatamente as mesmas que aparecem nas equações (3.5), (3.6) e (3.7), respectivamente. A coerência nessas definições é imprescindível, a fim de que a teoria dos conjuntos *fuzzy* comporte a teoria clássica dos conjuntos, e não ocorram contradições. Esta coerência é igualmente exigida dos conectivos lógicos *fuzzy*, apresentados a seguir.

3.1.3 Conectivos lógicos *fuzzy*

O operador lógico *fuzzy* de negação, simbolizado por \neg , é uma função que atua do seguinte modo:

$$\begin{aligned} \neg : [0, 1] &\rightarrow [0, 1] \\ a &\mapsto \neg a = 1 - a \end{aligned} \quad (3.8)$$

Convém notar que, restringindo-se o domínio dessa função ao conjunto $\{0, 1\}$, os valores obtidos: $\neg 0 = 1$, e $\neg 1 = 0$ estão de acordo com os resultados do operador de negação clássico.

Os conectivos lógicos *fuzzy* **e** e **ou** também são generalizações dos correspondentes conectivos clássicos. As funções que os representam atuam no conjunto $[0, 1] \times [0, 1]$, retornando um número real entre 0 e 1. Mas as operações realizadas por essas funções não são unicamente definidas. A rigor, a única restrição é que, nos extremos da região $[0, 1] \times [0, 1]$, isto é, nos vértices do quadrado mostrado na figura 10, esses operadores se comportem exatamente como os operadores clássicos. Nos pontos interiores, os valores podem ser arbitrariamente atribuídos, de acordo com as necessidades de cada aplicação.

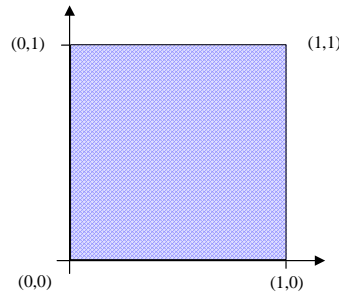


Figura 10: Região, no plano cartesiano, onde se aplicam os conectivos lógicos *fuzzy*.

De modo geral, os operadores **e** e **ou** são utilizados com suas definições originais (ZADEH, 1965), mostradas nas equações (3.9) e (3.10), respectivamente.

$$\begin{aligned} \mathbf{e} : [0, 1] \times [0, 1] &\rightarrow [0, 1] \\ (a, b) &\mapsto a \mathbf{e} b = \min\{a, b\} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{ou} : [0, 1] \times [0, 1] &\rightarrow [0, 1] \\ (a, b) &\mapsto a \mathbf{ou} b = \max\{a, b\} \end{aligned} \quad (3.10)$$

No entanto, outras definições também aparecem nas aplicações (YING, 2000). Para exemplificar, na equação (3.11), o operador *produto* é usado no lugar do *mínimo*, para modelar o conectivo lógico *fuzzy* **e**. Uma outra maneira de modelar o conectivo **ou** é por meio do operador

Lukasiewicz, representado na equação (3.12).

$$\begin{aligned} \mathbf{e} : [0, 1] \times [0, 1] &\rightarrow [0, 1] \\ (a, b) &\mapsto a \mathbf{e} b = a.b \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{ou} : [0, 1] \times [0, 1] &\rightarrow [0, 1] \\ (a, b) &\mapsto a \mathbf{ou} b = \min\{a + b, 1\} \end{aligned} \quad (3.12)$$

A fim de ilustrar os conectivos lógicos *fuzzy* apresentados, considere dois números $a = 0,3$ e $b = 0,5$. O resultado de $a \mathbf{e} b$ é $0,3$, se for considerado o operador mínimo, e $0,15$, se for escolhido o operador produto. Por sua vez, o resultado de $a \mathbf{ou} b$ é $0,5$, se for adotado o operador máximo, e $0,8$, se a opção for pelo operador *Lukasiewicz*.

A tabela 1 mostra os resultados das operações \mathbf{e} e \mathbf{ou} , na lógica clássica, nos vértices do quadrado $[0, 1] \times [0, 1]$. Como pode ser imediatamente verificado, os conectivos lógicos *fuzzy* \mathbf{e} apresentados acima, nas equações (3.9) e (3.11), respeitam os valores listados na segunda coluna da tabela. E o mesmo ocorre para os operadores \mathbf{ou} mostrados nas equações (3.10) e (3.12), com relação à terceira coluna da tabela.

Tabela 1: Resultados das operações lógicas \mathbf{e} e \mathbf{ou} , nos vértices do quadrado $[0, 1] \times [0, 1]$.

(a, b)	$a \mathbf{e} b$	$a \mathbf{ou} b$
(1, 1)	1	1
(1, 0)	0	1
(0, 1)	0	1
(0, 0)	0	0

3.1.4 Variáveis linguísticas

Um conjunto de funções de pertinência associadas a termos linguísticos pode ser usado para definir uma variável linguística. Assim, uma variável linguística é uma variável expressa qualitativamente por termos linguísticos. Por sua vez, cada termo linguístico é um conjunto *fuzzy*, definido quantitativamente por uma função de pertinência.

Por exemplo, uma variável linguística chamada *distância* pode ser caracterizada pelos termos linguísticos *pequena*, *média*, e *grande*. Cada um desses termos designa um conjunto *fuzzy*, identificado por uma função de pertinência. Cada elemento do conjunto universo $U = [0, 100]$ da variável *distância* está associado, por um determinado grau de pertinência, aos termos linguísticos, como ilustra a figura 11. Neste exemplo, o valor de distância $d = 25$ está

relacionado com grau 0,75 ao termo linguístico *pequena*, 0,2 ao termo *média*, e com grau zero ao termo *grande*.

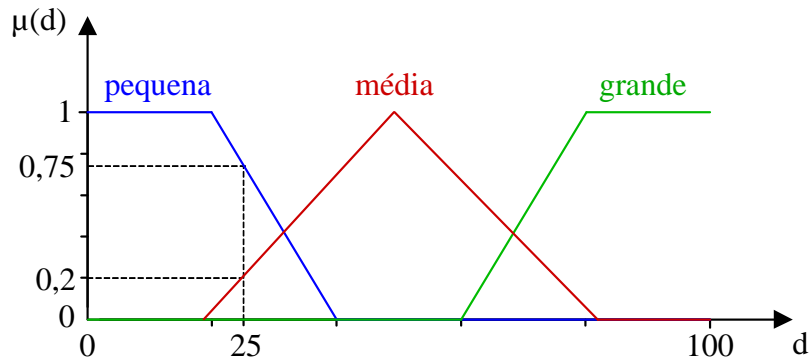


Figura 11: Variável linguística *distância*.

3.2 Sistemas baseados em regras fuzzy

Um sistema baseado em regras *fuzzy*, esquematizado na figura 12, é composto pelos seguintes blocos (JAFELICE; BARROS; BASSANEZI, 2005; SANDRI; CORREA, 1999): um processador de entrada, uma base de conhecimento, uma máquina de inferência, e um processador de saída.

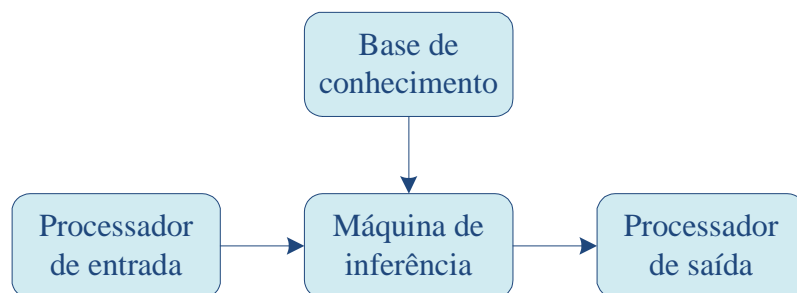


Figura 12: Esquema de um SBRF.

O processador de entrada realiza o processo de fuzzyficação, em que os valores de cada variável de entrada são associados por algum grau de pertinência aos termos linguísticos de sua respectiva variável linguística. Mais explicitamente, neste processo, as entradas reais do sistema são representadas por conjuntos *fuzzy*.

A base de conhecimento é formada por uma base de dados e uma base de regras. Constan da base de dados as funções de pertinência que caracterizam cada um dos termos linguísticos

associados às variáveis do sistema. A base de regras é um conjunto de proposições condicionais do tipo

Se <antecedente> **então** <consequente> ,

que determinam o comportamento do sistema. O antecedente de uma regra pode ser relativo a uma variável de entrada, ou a uma combinação delas, com o uso dos operadores lógicos *fuzzy*; e o consequente da regra está relacionado a uma variável de saída (SANDRI; CORREA, 1999).

A máquina de inferência é a responsável pelo controle de todo o processo. O que dá suporte à sua ação é a base de conhecimento. Dentre os métodos de inferência mais utilizados, estão o modelo de Mamdani e o modelo de Takagi-Sugeno (JAFELICE; BARROS; BASSANEZI, 2005; SANDRI; CORREA, 1999), comentados a seguir.

No modelo de Mamdani, o resultado do processamento de cada regra é um conjunto *fuzzy*. As regras são agregadas por algum operador lógico *fuzzy* **ou**, e a saída da máquina de inferência é o conjunto *fuzzy* resultante dessa operação.

Considere um sistema S com duas variáveis de entrada X_1 e X_2 e uma variável de saída Y , em que as variáveis linguísticas X_1 , X_2 e Y podem assumir, respectivamente, os termos linguísticos: A e A' , B , e C e C' .

A figura 13 ilustra o processo de inferência de Mamdani para o sistema S , no caso em que seu comportamento é dado pelas seguintes regras:

R_1 : Se X_1 é A e X_2 é B , então, Y é C ; e

R_2 : Se X_1 é A' e X_2 é B , então, Y é C' .

Dados os valores x_1 e x_2 , pertencentes respectivamente aos domínios das variáveis de entrada X_1 e X_2 , o antecedente da regra R_1 é o número $\mu = \min\{\mu_A(x_1), \mu_B(x_2)\}$, desde que seja adotado o operador lógico *fuzzy* **e** conforme a equação (3.9). No modelo de Mamdani, a regra de inferência relaciona o antecedente com o consequente da regra da seguinte maneira: para cada valor y do domínio da variável de saída Y , calcula-se $\mu_D(y) = \min\{\mu, \mu_C(y)\}$. Ou seja, o resultado de R_1 é o conjunto *fuzzy* D . Procedimento análogo é feito para a regra R_2 , resultando o conjunto *fuzzy* D' . As regras são agregadas com o operador lógico *fuzzy* **ou** dado pela equação (3.10), e o resultado do processo de inferência é o conjunto *fuzzy* $F = D \cup D'$.

No modelo de Takagi-Sugeno, o consequente de cada regra é calculado por meio de uma função, geralmente uma combinação linear das variáveis de entrada. O resultado do processa-

mento de cada regra é um número, e a saída do sistema é a média ponderada das saídas de cada regra.

O processo de inferência de Takagi-Sugeno é ilustrado na figura 14 para o sistema S , no caso em que seu comportamento é dado pelas seguintes regras:

$$R_1: \text{Se } X_1 \text{ é } A \text{ e } X_2 \text{ é } B, \text{ então, } Y_1 = \alpha_1 X_1 + \beta_1 X_2 + \gamma_1; \text{ e}$$

$$R_2: \text{Se } X_1 \text{ é } A' \text{ e } X_2 \text{ é } B, \text{ então, } Y_2 = \alpha_2 X_1 + \beta_2 X_2 + \gamma_2,$$

em que $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \gamma_1$ e γ_2 são constantes pré-fixadas. Dados os valores x_1 e x_2 pertencentes respectivamente aos domínios das variáveis de entrada X_1 e X_2 , o resultado da regra R_1 é o número $y_1 = \alpha_1 x_1 + \beta_1 x_2 + \gamma_1$. O resultado de R_2 é y_2 , calculado analogamente. A saída do processo de inferência é o número:

$$y = \frac{w y_1 + w' y_2}{w + w'}, \quad (3.13)$$

onde $w = \mu_A(x_1) \text{ e } \mu_B(x_2)$ e $w' = \mu_{A'}(x_1) \text{ e } \mu_B(x_2)$, para algum conectivo lógico fuzzy e .

O processador de saída realiza a desfuzzyficação, em que a saída do processo de inferência, que geralmente é um conjunto fuzzy F , é representada por um número real v . Comumente são utilizados no processo de desfuzzyficação os métodos do primeiro máximo e do centro de gravidade (COX, 1992).

No método do primeiro máximo, é escolhido para representar o conjunto fuzzy F o primeiro ponto do domínio que apresente grau de pertinência máximo com relação a F . No caso do método de centro de gravidade, o conjunto fuzzy F é representado por uma média ponderada v , onde os pesos são os graus de pertinência dos elementos do domínio com relação a F (JAFELICE; BARROS; BASSANEZI, 2005), ou seja:

$$v = \frac{\int y \mu_F(y) dy}{\int \mu_F(y) dy}. \quad (3.14)$$

Sendo a última etapa do SBRF, deve-se ter cuidado ao escolher o método de desfuzzyficação, para garantir que o valor de saída represente bem a informação contida no conjunto fuzzy. O método do centro de gravidade, apesar de ser computacionalmente mais complexo do que o método do primeiro máximo, geralmente apresenta melhores resultados nas aplicações de controle automático (COX, 1992).

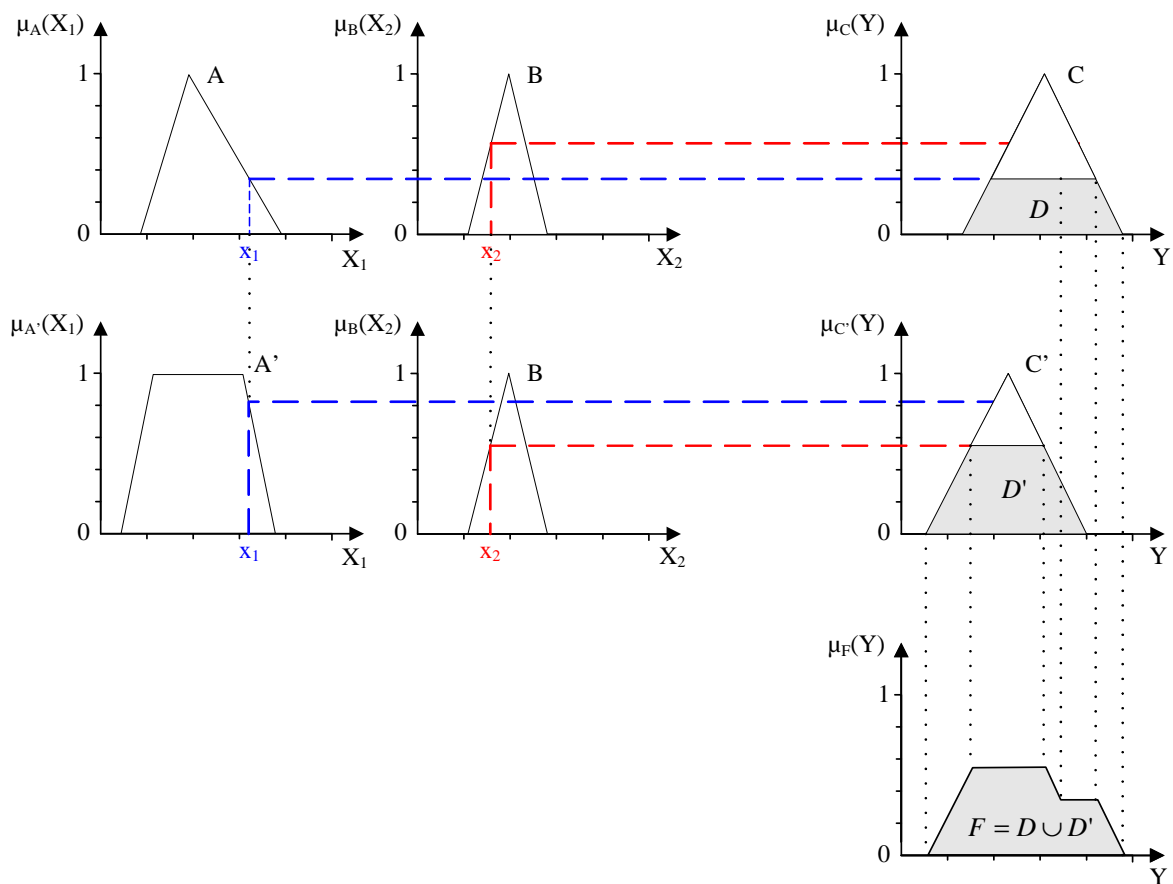


Figura 13: Modelo de Mamdani.

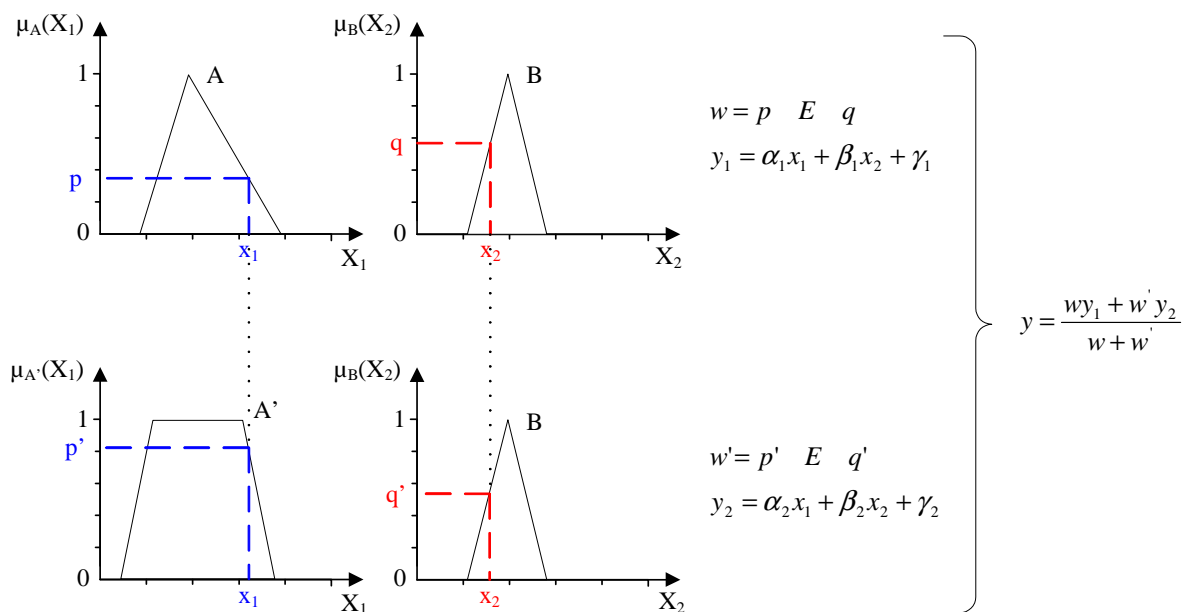


Figura 14: Modelo de Takagi-Sugeno.

4 *O algoritmo de roteamento implementado*

A implementação de um sistema baseado em regras *fuzzy* para o roteamento em redes ópticas é um dos principais objetivos deste trabalho. Para dar suporte a essa implementação é adequada uma ferramenta de simulação de redes, pois os elevados custos dos equipamentos que constituem os nós de uma rede óptica inviabilizam a criação de uma rede de grande porte para pesquisas.

Em um simulador de redes ópticas, a princípio, é possível considerar redes de qualquer tamanho, limitado apenas pela capacidade do computador. Com relação aos algoritmos RWA, é possível implementar em um simulador as mais diversas técnicas existentes, tanto para o roteamento, quanto para a alocação dos comprimentos de onda. Essas técnicas podem ser empregadas para analisar o desempenho de redes, ou ainda investigar a combinação de métodos que melhor se adequa a uma rede específica.

Um simulador de redes deve ser flexível, permitindo a inclusão de novos métodos, além da variação de parâmetros nos algoritmos existentes, como por exemplo, a alteração do critério utilizado na busca das rotas, ou a quantidade de rotas pesquisadas, no caso do roteamento fixo alternativo. Além disso, é necessário que estas tarefas sejam realizadas de modo relativamente simples, a fim de que, quando for o caso de incluir novas ferramentas ao simulador, o foco do problema não seja desviado para questões especificamente relacionadas à estruturação e à codificação do programa.

A decisão sobre a ferramenta de simulação mais apropriada foi um ponto crítico na fase inicial deste trabalho. O motivo para isso é que a intenção não era apenas usar um *software* para realizar simulações mas, sobretudo, implementar um outro algoritmo de roteamento, e ainda, disponibilizá-lo publicamente, se possível.

Devido a experiências anteriores (PAIVA et al., 2007), foi considerada a possibilidade da utilização do programa OWns (*Optical WDM Network Simulator*) (WEN et al., 2001), que é

uma extensão do NS-2*. Porém, as atualizações do OWns foram descontinuadas desde 2001**, e isso poderia ocasionar problemas futuros.

Nenhum simulador de redes ópticas foi encontrado, que atendessem a requisitos fundamentais como: (i) ser distribuído gratuitamente, (ii) disponibilizar o código fonte, (iii) permitir a inclusão de novos módulos, de maneira relativamente simples, e (iv) ser atualizado periodicamente.

Paralelamente, estava em fase de desenvolvimento um programa simulador de eventos discretos para redes ópticas (MAIOLI, 2007), pelo mesmo grupo de pesquisa em que se insere este trabalho, o Grupo de Pesquisa em Telecomunicações da UFES (GPTUFES). E esse simulador foi, então, adotado como a principal ferramenta de apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

O simulador está implementado em linguagem C e é formado por módulos com diferentes finalidades. Assim, é possível realizar alterações em determinadas partes e aproveitar integralmente outras partes do código.

Na seção 4.1, é apresentada uma breve descrição do modo de funcionamento do simulador. Mais detalhes sobre a implementação do algoritmo, sobre o processo de validação do simulador e sobre os testes de convergência da probabilidade de bloqueio podem ser obtidos em (MAIOLI, 2007).

No contexto do projeto de redes ópticas, o simulador realiza apenas a etapa de RWA, e não a de VTD. Ou seja, assume-se que a topologia de entrada é uma topologia virtual, e nela são realizadas as etapas de roteamento e alocação de comprimentos de onda.

Para a escolha da rota, são disponibilizados originalmente pelo simulador os algoritmos de roteamento estáticos fixo, e fixo alternativo. E a busca das rotas segue o critério do menor número de enlaces.

Um outro método de roteamento é implementado utilizando um SBRF. Na escolha da rota que atenderá uma determinada requisição de conexão, dado o par origem-destino, o sistema *fuzzy* leva em consideração dois critérios: o número de enlaces que compõem as possíveis rotas e a quantidade de comprimentos de onda disponíveis em cada uma delas, no momento em que ocorre a requisição.

Os detalhes do sistema *fuzzy* desenvolvido são apresentados na seção 4.2, sendo que o funcionamento geral de um SBRF foi descrito no capítulo 3. A modelagem do sistema *fuzzy* é bastante flexível, permitindo ajustes em vários aspectos. Isso torna possível a determinação do

*NS-2: The Network Simulator. Disponível em <http://www.isi.edu/nsnam/ns>. Acesso em: 21/07/2008.

**Fonte: http://dawn.cs.umbc.edu/owns/owns_readme.html. Acesso em: 21/07/2008.

conjunto de parâmetros mais adequado à cada rede. Mas neste trabalho, optou-se por fixar os parâmetros do sistema *fuzzy* e analisar sua adequação às redes escolhidas para as simulações.

Foram escolhidas para as simulações duas redes com topologias distintas: uma rede em malha regular com 16 nós e 32 enlaces e uma rede em malha irregular com 14 nós e 20 enlaces. No capítulo 5, o desempenho das duas redes foi analisado, com relação à probabilidade de bloqueio e à utilização de recursos, usando os algoritmos de roteamento estáticos fixo e fixo alternativo, e o roteamento feito com o sistema *fuzzy*, detalhado na seção 4.3.

4.1 O simulador de eventos discretos para redes ópticas

O simulador de eventos discretos para redes ópticas (MAIOLI, 2007) é um programa computacional capaz de simular o comportamento de uma rede óptica sem conversores de comprimento de onda. O modo de funcionamento do simulador é resumido no diagrama de blocos apresentado na figura 15.

Para o processo de escolha da rota, o simulador disponibiliza dois métodos: o roteamento fixo e o roteamento fixo alternativo. E para a atribuição dos comprimentos de onda, também há duas opções: First-Fit e Aleatório. Todos esses algoritmos foram descritos na seção 2.1.

Os dados da rede a ser simulada, como as ligações entre os nós e o número de comprimentos de onda por enlace, são parâmetros de entrada passados para o programa na forma de um arquivo de texto. Também devem ser informados inicialmente: o número de requisições de conexão que serão simuladas e a duração média delas. Devem ser escolhidos o tipo de roteamento e o modo de atribuição dos comprimentos de onda. No caso do roteamento fixo alternativo, ainda é necessário determinar o número k de rotas alternativas que serão pesquisadas. As variáveis de entrada do simulador são mostradas na tabela 2.

Tabela 2: Variáveis de entrada do simulador.

nome	tipo da variável	descrição
N	característica da rede	número de nós da rede
matAdj	característica da rede	matriz com as ligações entre os nós
W	característica da rede	número de comprimentos de onda por enlace
nEv	parâmetro da simulação	número de requisições de conexão
tMedioServico	parâmetro da simulação	duração média das requisições
metodoR	parâmetro da simulação	algoritmo de roteamento
metodoWA	parâmetro da simulação	algoritmo de atribuição de comprimentos de onda
k	parâmetro da simulação	número de rotas alternativas

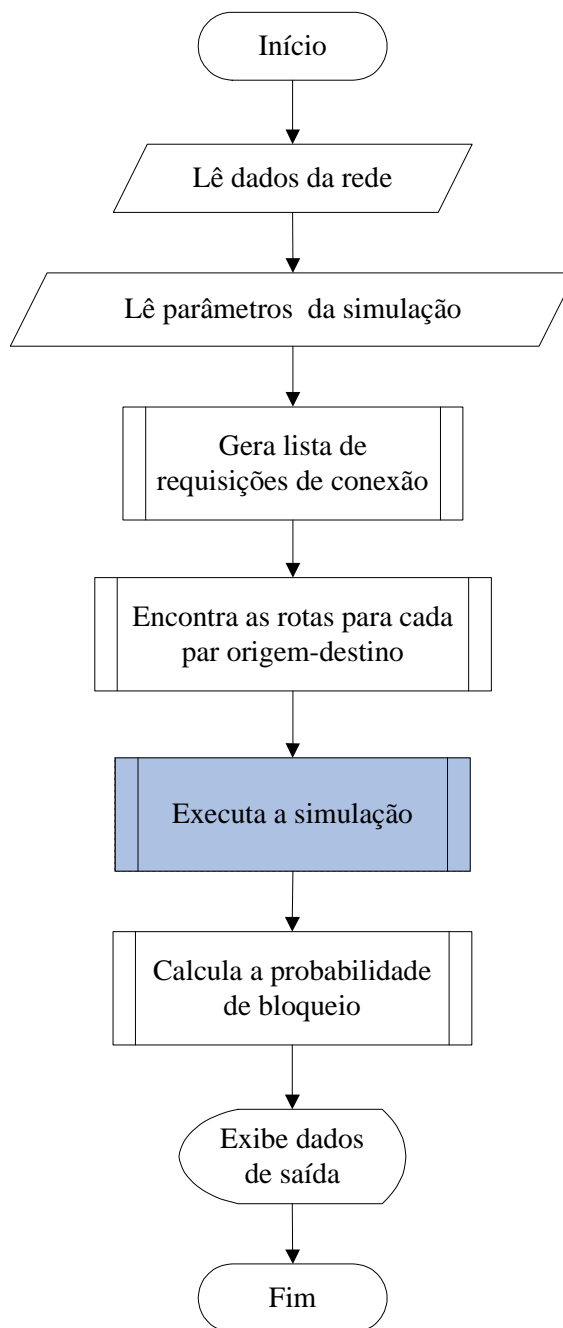


Figura 15: Diagrama de blocos simplificado do simulador.

Descrita a topologia da rede e definidos os parâmetros iniciais, é utilizado um processo poissoniano (HINES et al., 2006; CAMPELO, 2006) para gerar as requisições de conexão entre os pares origem-destino. Assim, o intervalo entre as chegadas segue uma distribuição exponencial. Pode-se optar por uma distribuição exponencial, de Pareto ou Pareto truncado, para a atribuição da duração das requisições. Para cada requisição de conexão, os nós origem e destino são escolhidos aleatoriamente, sendo que cada nó gera ou recebe uma conexão de acordo com uma distribuição estatística uniforme, isto é, a demanda de tráfego é uniforme entre todos os nós da rede.

No caso do roteamento fixo alternativo, o algoritmo de Yen (YEN, 1972), que é uma generalização do algoritmo de Dijkstra, é utilizado para encontrar as k menores rotas para cada par origem-destino da rede. O critério adotado para isto é o número de enlaces da rota. As rotas são armazenadas em uma tabela de roteamento, em ordem crescente com relação ao número de enlaces. No caso de empate na quantidade de enlaces, armazenam-se as rotas na ordem em que foram encontradas pelo algoritmo de Yen. No caso do roteamento fixo, a diferença é que somente uma rota, a de menor número de enlaces, é definida para cada par origem-destino.

O bloco destacado na figura 15 representa a principal tarefa do algoritmo: a execução da simulação, de acordo com os métodos de RWA escolhidos inicialmente. Essa tarefa é realizada originalmente pelo simulador da maneira descrita a seguir.

As requisições são simuladas por ordem de chegada. A cada requisição, a tabela de roteamento correspondente ao par origem-destino é percorrida, verificando-se, em cada rota, a disponibilidade de um comprimento de onda em todos os seus enlaces. Desse modo, quando uma requisição é aceita, ela usa a rota com menor número de enlaces disponível, e o algoritmo escolhido no início da simulação é usado para a alocação do comprimento de onda. Caso nenhuma rota esteja disponível no momento, a requisição é bloqueada.

No final da simulação, é calculada a probabilidade de bloqueio PB , dada pela razão entre o número de requisições bloqueadas e o número total de requisições de conexão nEv . Ou seja,

$$PB = \frac{nEv - nAc}{nEv}, \quad (4.1)$$

em que nAc é o número de requisições aceitas.

4.2 Descrição do sistema fuzzy implementado

O SBRF implementado possui duas entradas e uma saída. As entradas representam elementos importantes na escolha da rota para atender uma determinada requisição de conexão: o número de enlaces e a ocupação da rota no momento da requisição. A ocupação da rota é definida como sendo o número de comprimentos de onda contínuos ocupados ao longo da rota. A saída do sistema é um número pertencente ao intervalo $[0,1]$, que representa um custo para a rota. O custo unitário indica que a rota não está disponível, ou seja, que não existe um comprimento de onda disponível em todos os seus enlaces.

Na etapa de fuzzyficação, são definidos os termos linguísticos apropriados a cada variável de entrada do sistema. Nesse processo, cada valor de entrada é associado, por algum grau de pertinência, aos termos linguísticos da variável correspondente.

A figura 16 mostra a variável linguística *ocupação*. O valor da ocupação de uma rota pode variar entre zero e o número de comprimentos de onda permitidos em cada enlace, simbolizado por $N\lambda$. Neste universo, foram considerados os termos linguísticos: *baixa*, *regular* e *alta*. Cada um desses termos é representado por uma função de pertinência trapezoidal, cujos parâmetros foram estabelecidos empiricamente.

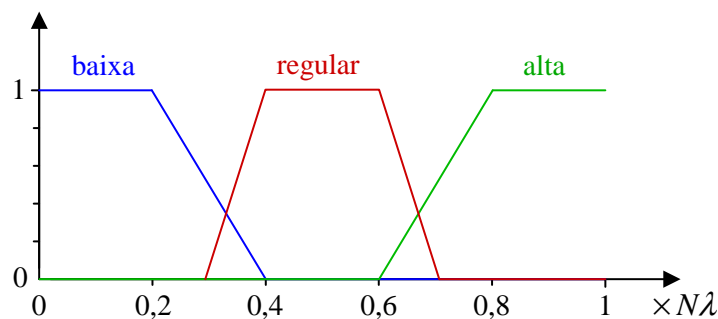


Figura 16: Variável linguística de entrada: ocupação da rota. $N\lambda$ representa o número de comprimentos de onda por enlace da rede.

A variável *número de enlaces da rota* pode assumir os valores: *pequeno*, *médio* e *grande*. As funções de pertinência adotadas para esta variável, também trapezoidais, são mostradas na figura 17.

No caso da variável *número de enlaces*, a topologia da rede influencia a determinação do conjunto universo, e consequentemente, dos parâmetros das funções de pertinência. Por isso, em cada simulação, o número de enlaces da maior rota, simbolizado por H , foi usado como limite superior do conjunto universo, a fim de obter uma precisão maior no cálculo do custo da rota.

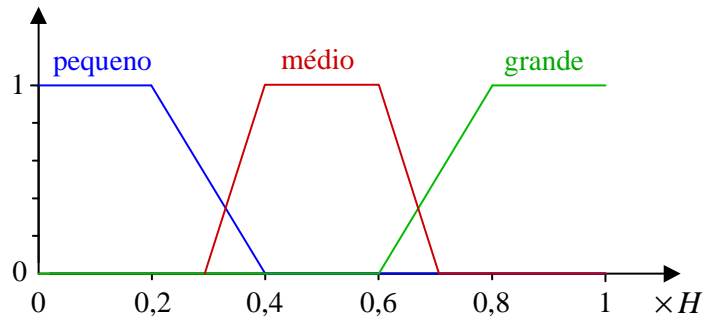


Figura 17: Variável linguística de entrada: número de enlaces. A variável H representa o número de enlaces da maior rota.

Mais explicitamente, considerando duas redes com topologia em anel, uma com 4 e outra com 10 nós, ambas com W comprimentos de onda por enlace, como definir o conjunto universo da variável *número de enlaces*? Sabendo que em uma rede em anel com N nós, a maior rota possível tem $N - 1$ enlaces, poderíamos escolher o intervalo $[1, 9]$, pois ele, a princípio, atenderia as duas redes. No entanto, ao dividir este intervalo em três níveis, por exemplo, considerando o número de enlaces da rota *pequeno*, se ele estiver no intervalo $[1, 3]$, *médio* no intervalo $]3, 6]$, e *grande* no intervalo $]6, 9]$, todas as rotas da rede de 4 nós seriam classificadas como tendo um *pequeno* número de enlaces. E isso não é adequado para o sistema, pois faria com que a decisão da rota fosse tomada com base apenas no valor da ocupação.

Por outro lado, também não basta usar o número de nós da rede como limite superior para o conjunto universo, como poderia sugerir este exemplo. De fato, seria uma boa aproximação para redes em anel, em que o número de nós é suficiente para estimar o número de enlaces de uma rota ligando qualquer par origem-destino. Entretanto, não se pode fazer esta estimativa sequer para redes com topologia em malha, que são muito comuns.

Assim, a saída encontrada para tornar o sistema *fuzzy* mais geral foi usar em cada simulação o número de enlaces da maior rota, considerando as k alternativas, como limite superior do conjunto universo desta variável. A variável H é obtida a partir da tabela de roteamento, que é calculada previamente, e por isso, não acrescenta operações ao processo de roteamento.

Por simplicidade, foi adotado o método de inferência de Mamdani. Consequentemente, a saída do sistema, ou seja, o custo da rota, é uma variável linguística.

A variável *custo da rota* é modelada por conjuntos *fuzzy* que representam os termos linguísticos *excelente*, *bom*, *regular* e *ruim*, definidos no conjunto universo $[0, 1]$. As funções de pertinência adotadas são mostradas na figura 18.

Quando são consideradas as entradas *número de enlaces* e *ocupação* e a saída *custo da rota*,

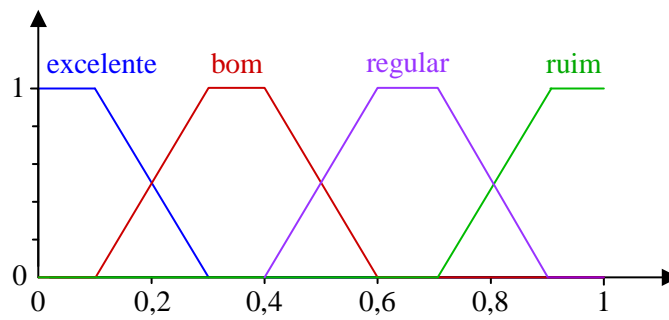


Figura 18: Variável linguística de saída: custo da rota.

intuitivamente, pode-se esperar que o custo da rota seja menor quanto menores forem o número de enlaces e a ocupação. Com relação ao número de enlaces, esse raciocínio até se justifica, pois rotas maiores ocupam mais recursos da rede para atender a uma mesma requisição de conexão. Porém, não há uma razão fundamental para dar prioridade a uma rota pouco ocupada em detrimento de outra muito ocupada. A coexistência dos algoritmos Most-used e Least-used, para alocação de comprimentos de onda, de certa forma ilustra esta idéia. Assim, é igualmente razoável considerar que o custo da rota seja menor quanto menor for o número de enlaces e maior for a ocupação. Neste sistema, a preferência arbitrariamente foi dada a rotas menos ocupadas.

Combinando os três termos linguísticos que cada uma das variáveis de entrada pode assumir, foram criadas nove regras para caracterizar o sistema, ou seja, para traduzir o comportamento esperado do sistema em cada caso.

Como o *custo da rota* depende simultaneamente das variáveis *número de enlaces* e *ocupação*, é utilizado o operador lógico *fuzzy e* no antecedente de cada regra. A definição adotada para este operador é a que aparece na equação (3.9).

Para exemplificar, uma das regras estabelecidas é a seguinte: **Se** o *número de enlaces* é *pequeno* **e** a *ocupação* é *baixa*, **então**, o *custo da rota* é *excelente*. O conjunto de regras é apresentado na tabela 3.

O funcionamento geral do SBRF pode ser resumido da maneira seguinte.

Dados valores de entrada referentes ao número de enlaces e à ocupação de uma determinada rota, estes valores passam pelo processo de fuzzyficação, e são aplicadas as regras conforme a tabela 3. De acordo com o modelo de Mamdani, abordado na seção 3.2, a saída de cada regra é um conjunto *fuzzy* e um operador lógico *fuzzy ou* é usado para agregar as regras. Para esse operador é utilizada a definição mostrada na equação (3.10). O conjunto *fuzzy* resultante passa pelo processo de desfuzzyficação, para o qual é adotado o método do centro de gravidade. O

Tabela 3: Regras fuzzy utilizadas nas simulações.

número de enlaces	ocupação	custo
pequeno	baixa	excelente
pequeno	regular	bom
pequeno	alta	bom
médio	baixa	bom
médio	regular	regular
médio	alta	ruim
grande	baixa	regular
grande	regular	ruim
grande	alta	ruim

valor fornecido nesta última etapa corresponde ao custo da rota.

A superfície ilustrada na figura 19 representa o custo associado à cada rota pelo SBRF, para o número de enlaces e a ocupação da rota variando de 0 a 10.

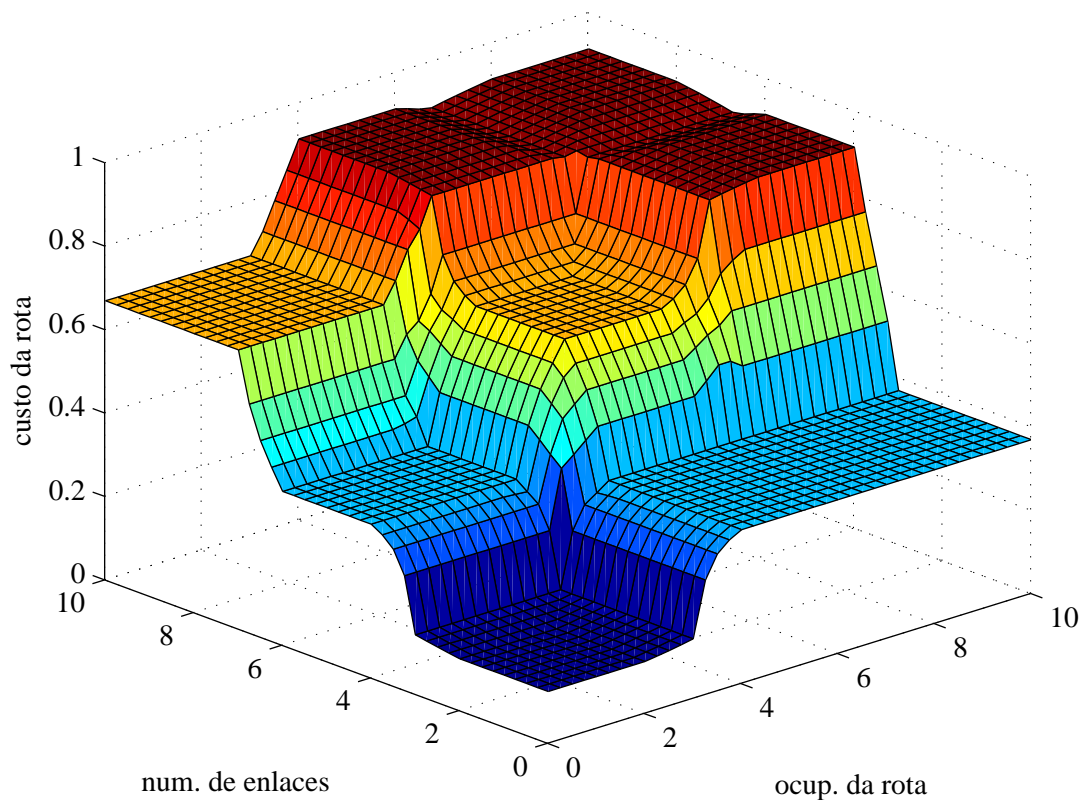


Figura 19: Superfície representando o custo da rota gerado pelo SBRF, variando-se o número de enlaces e a ocupação da rota.

4.3 Roteamento com o sistema *fuzzy*

O modo como o SBRF é usado para o roteamento é explicado a seguir, e é também revisto o esquema de roteamento fixo alternativo, originalmente implementado no simulador (ver seção 4.1), para acentuar as diferenças entre os dois. Desse ponto do texto em diante, o método de roteamento fixo alternativo será denominado roteamento convencional, e o esquema usando o SBRF será denominado roteamento *fuzzy*.

Os algoritmos 9 e 10 correspondem ao bloco em destaque na figura 15, **Executa a simulação**, respectivamente para os métodos de roteamento convencional e *fuzzy*. Os dois algoritmos recebem como argumentos de entrada: uma lista com as requisições de conexão a serem simuladas; o conjunto das tabelas $T(s, d)$ com as k menores rotas para cada par de nós origem s e destino d da rede, de acordo com o critério de número de enlaces; e uma lista L com os comprimentos de onda em uma certa ordem.

No roteamento convencional, para cada requisição de conexão simulada, a tabela T correspondente ao par origem-destino é percorrida, e a primeira rota que tiver algum comprimento de onda disponível é selecionada. O algoritmo de atribuição de comprimento de onda escolhido no início da simulação é usado para o atendimento da requisição de conexão.

No roteamento *fuzzy*, para cada requisição de conexão simulada, é percorrida *toda* a tabela de roteamento T correspondente ao par origem-destino, e um custo é atribuído a cada rota, levando em consideração o número de enlaces e a ocupação da rota no momento. Rotas totalmente ocupadas recebem custo máximo, e as outras rotas são armazenadas em uma tabela T' , em ordem crescente com relação ao custo. Desde que T' não esteja vazia, sua primeira rota é selecionada, e a requisição de conexão é atendida com um comprimento de onda alocado conforme o algoritmo escolhido no início da simulação.

Algoritmo 9 Roteamento convencional

Entrada: Uma lista com as requisições de conexão a serem simuladas, o conjunto das tabelas $T(s, d)$ com as k menores rotas para cada par de nós (s, d) da rede e uma lista L com os comprimentos de onda em uma certa ordem.

Saída: O número de requisições de conexão atendidas pela simulação.

```

1: Início
2:   Para cada requisição de conexão  $l$ , do nó  $s$  para o nó  $d$ 
3:     Para cada rota  $r_i$  da tabela  $T(s, d)$ 
4:       Chame um algoritmo de atribuição de comprimento de onda, que retorna  $\lambda$ 
5:       Se  $\lambda \neq \emptyset$ , então
6:         Escolha a rota  $r_i$  e o comprimento de onda  $\lambda$ 
7:         Incremente o número de requisições de conexão atendidas
8:       Fim Para
9:     Fim Se
10:   Fim Para
11: Fim Para
12: Fim

```

Algoritmo 10 Roteamento *Fuzzy*

Entrada: Uma lista com as requisições de conexão a serem simuladas, o conjunto das tabelas $T(s, d)$ com as k menores rotas para cada par de nós (s, d) da rede e uma lista L com os comprimentos de onda em uma certa ordem.

Saída: O número de requisições de conexão atendidas pela simulação.

```

1: Início
2:   Para cada requisição de conexão  $l$ , do nó  $s$  para o nó  $d$ 
3:     Para cada rota  $r_i$  da tabela  $T(s, d)$ 
4:       Chame o sistema fuzzy para calcular o custo  $c$  de  $r_i$ 
5:       Se  $c$  não é máximo, então, armazene  $r_i$  em uma tabela  $T'$ , por ordem de custo
6:     Fim Para
7:     Se a tabela  $T'$  não está vazia, então
8:       Escolha a primeira rota  $r$  de  $T'$ 
9:       Chame um algoritmo para atribuir um comprimento de onda à rota  $r$ 
10:      Incremente o número de requisições de conexão atendidas
11:    Fim Se
12:  Fim Para
13: Fim

```

5 Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados das simulações realizadas com as duas redes ilustradas na figura 20 e as discussões pertinentes. Os resultados foram obtidos com o simulador de eventos discretos, descrito na seção 4.1, aplicando-se os algoritmos de roteamento estáticos fixo e fixo alternativo, e o roteamento feito com o sistema *fuzzy*. Foram avaliadas a probabilidade de bloqueio e a utilização de recursos da rede. A fim de identificar se um ou outro método se adapta melhor em alguma situação específica, foram escolhidas redes com topologias bem distintas.

A primeira rede analisada, que aparece na figura 20(a), é uma rede em malha regular com 16 nós e 32 enlaces bidirecionais. Em seguida, é feita a análise de uma rede em malha irregular com 14 nós e 20 enlaces bidirecionais, mostrada na figura 20(b). Nas duas redes, foi admitido que cada enlace permite a propagação de 8 comprimentos de onda.

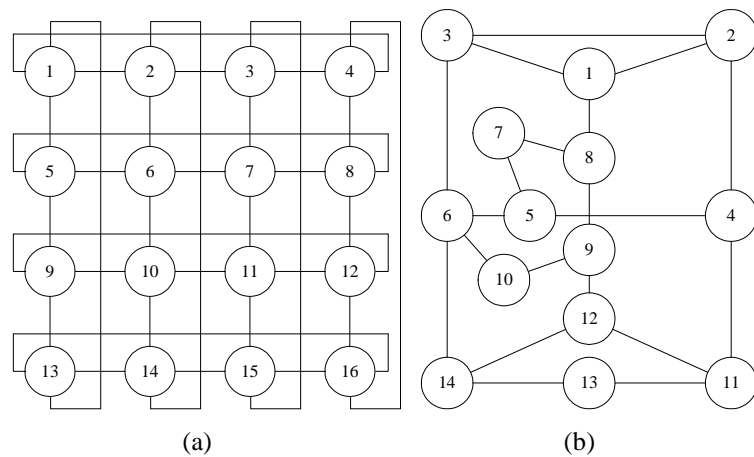


Figura 20: Redes simuladas: (a) rede em malha regular com 16 nós e 32 enlaces e (b) rede em malha irregular com 14 nós e 20 enlaces. Todos os enlaces são bidirecionais.

Inicialmente, deve ficar claro que tanto para o método convencional quanto para o *fuzzy*, a primeira etapa do roteamento, que consiste na busca das menores rotas entre cada par origem-destino, é feita com base no número de enlaces da rota. Assim, ao se optar por fazer o roteamento com apenas um caminho, haverá exclusivamente a rota com o menor número de enlaces.

E os dois algoritmos terão exatamente os mesmos resultados, uma vez que não há nenhuma escolha a ser feita. Desse modo, a curva de probabilidade de bloqueio relativa a $k = 1$ é uma boa referência para os dois casos.

A curva de probabilidade de bloqueio é feita em função da carga oferecida à rede, dada em erlangs. O procedimento adotado para a análise da probabilidade de bloqueio de cada rede é o seguinte:

- Levantar a curva de bloqueio para $k = 1$;
- Verificar o valor de carga C que corresponde a uma taxa de 20% de bloqueio;
- Usar a faixa de carga de 0 a C erlangs nas outras simulações, variando-se o k .

Assim, para analisar a taxa de bloqueio da rede foi estabelecido um valor limite de 20% de bloqueio, obtido com $k = 1$. As simulações feitas em cada rede, variando-se o k , utilizaram a faixa de carga obtida neste procedimento. O número de rotas alternativas foi usado como parâmetro para a análise.

O método de roteamento fixo, correspondente a $k = 1$, apresenta taxas de bloqueio muito elevadas (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000). Isso acontece porque, para atender uma requisição de conexão entre dois nós quaisquer da rede, é necessário encontrar um comprimento de onda disponível em todos os enlaces da única rota que os interliga. Quando há outras rotas possíveis, deve-se encontrar um comprimento de onda disponível em todos os enlaces de *alguma* destas rotas. Portanto, ao considerar caminhos alternativos, aparentemente aumentam as chances de que uma determinada requisição possa ser atendida. Aparentemente porque, caso a rota alternativa tenha muitos mais enlaces do que a rota fixa, será ainda mais difícil encontrar um comprimento de onda que atenda simultaneamente todos os enlaces.

Admitindo que, ao considerar rotas alternativas, aumentam as chances de que uma determinada requisição de conexão possa ser atendida, ainda é preciso questionar se isso não é apenas um efeito local, ou seja, se necessariamente isso leva a uma redução na probabilidade de bloqueio da rede. O motivo pelo qual o fato poderia não ocorrer é que, aceitando uma requisição por uma rota alternativa, ela possivelmente terá mais enlaces, e assim, ocupará mais recursos da rede. E isto pode fazer com que as próximas requisições sejam bloqueadas.

Assumindo simplesmente que o roteamento fixo alternativo proporciona uma redução na taxa de bloqueio da rede, pode-se indagar se esta taxa é menor quanto maior for o k , ou se existe um limite a partir do qual ocorre uma estabilização destes valores.

Com a intenção de investigar, em cada método de roteamento e em cada rede, se a quantidade de caminhos alternativos influencia nos resultados de probabilidade de bloqueio, foram feitas simulações variando-se o k . A curva relativa a $k = 1$, que corresponde ao roteamento fixo, foi usada como referência. Nas duas redes, foram realizadas simulações considerando $k = 1, 2, 5$ e 10 .

Paralelamente, foram comparadas as taxas de bloqueio obtidas pelos métodos de roteamento convencional e *fuzzy* em cada rede.

Em seguida, é apresentada a curva completa de probabilidade de bloqueio *versus* carga, obtida ao aumentar a carga na rede até ocorrer a saturação. Isso foi feito com o objetivo de verificar se os resultados para a faixa de carga 0 a C erlangs analisada podem ser generalizados.

Ainda foi realizado um estudo quantitativo das requisições de conexão aceitas e bloqueadas, com o intuito de analisar as seguintes questões:

- De um modo geral, quando uma requisição de conexão é aceita: qual é a diferença entre o número de enlaces da rota que efetivamente atende a requisição e o número de enlaces da menor rota que poderia atendê-la?
- Considerando somente as requisições que foram bloqueadas, de quanto recurso cada uma delas precisava para ser atendida? Ou seja, quantos enlaces têm a menor rota que poderia atender uma determinada requisição de conexão, dado que esta foi bloqueada?

Neste contexto, uma rota com o menor número possível de enlaces, capaz de atender uma determinada requisição de conexão, será denominada rota mínima.

Para este estudo, o conjunto M de todas as requisições de conexão foi dividido em três classes, de acordo com os recursos de rede utilizados. Na primeira classe, estão as requisições bloqueadas; na segunda classe as requisições que usaram rotas mínimas; e na terceira classe, estão as outras rotas, que ocuparam um ou mais enlaces além da quantidade usada por uma rota mínima. São apresentados gráficos em colunas, representando estas três classes, simultaneamente para os métodos de roteamento convencional e *fuzzy*.

Na sequência, é feita uma análise mais detalhada, com relação à classe das requisições bloqueadas. Para isso, sendo H o número de enlaces da maior rota da simulação, considere $M = M_1 \cup M_2 \cup \dots \cup M_H$, onde M_i , $i = 1, 2, \dots, H$ representa a classe das requisições com i enlaces na rota mínima. A porcentagem de requisições bloqueadas para cada uma destas classes, é apresentada graficamente e discutida para as duas redes simuladas.

Neste estudo, também foram utilizados os valores extremos de carga em cada rede, que foram obtidos com $k = 1$, na situação de 20% de bloqueio. Nas duas redes, a análise foi feita com $k = 5$.

Em cada simulação, foram geradas 10 mil requisições de conexão, sendo os pares origem-destino escolhidos de forma aleatória. Para a atribuição da duração das requisições, foi utilizada uma distribuição exponencial.

É importante observar que o número de requisições de conexão simuladas foi determinado a fim de se obter a convergência da probabilidade de bloqueio. Conforme (MAIOLI, 2007), esse número está diretamente relacionado à distribuição estatística adotada para a duração das requisições.

Para garantir uma uniformidade na comparação, no algoritmo para geração aleatória das requisições de conexão, foram usadas as mesmas sementes para os métodos de roteamento convencional e *fuzzy*. Foi escolhido arbitrariamente um conjunto de 20 sementes, e os resultados apresentados são uma média aritmética simples dos valores obtidos com cada uma delas.

Em todas as simulações, foi adotado o método First-fit para a atribuição dos comprimentos de onda.

5.1 Rede em malha regular

A rede com topologia em malha regular, reproduzida na figura 21, é constituída por 16 nós e 32 enlaces bidirecionais. Para esta rede, com $k = 1$, foi obtida a taxa de 20% de bloqueio com uma carga de 140 erlangs. Assim, a probabilidade de bloqueio da rede foi estudada no intervalo $[0, 140]$ erlangs. E para a situação de carga máxima, fixado $k = 5$, foi realizada uma análise a respeito do uso das rotas pelas políticas de roteamento convencional e *fuzzy*.

A figura 22 mostra a probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para os dois algoritmos de roteamento. Tanto nas curvas referentes ao roteamento convencional, quanto nas referentes ao roteamento *fuzzy*, observa-se que a probabilidade de bloqueio na rede diminui consideravelmente quando o número de rotas alternativas aumenta de $k = 1$ para $k = 2, 5$ e 10. Desse modo, com a mesma quantidade de recursos na rede, é possível atender um número maior de requisições, oferecendo mais rotas alternativas às políticas de roteamento.

Ainda na mesma figura, nota-se que, quando $k = 1$, as versões convencional e *fuzzy* apresentam valores idênticos de probabilidade de bloqueio, conforme esperado. Quando há rotas alternativas (nos casos $k = 2, 5$ e 10), é necessário efetuar uma escolha, e a decisão tomada pode

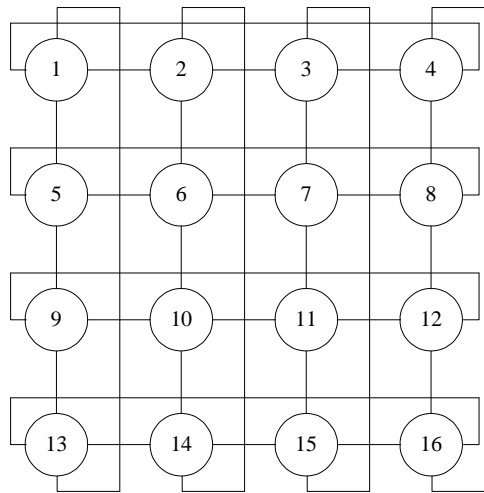


Figura 21: Rede de 16 nós e 32 enlaces bidirecionais.

afetar a probabilidade de bloqueio da rede. Nesta rede, para $k = 2$, $k = 5$ e $k = 10$, é significativa a redução na probabilidade de bloqueio obtida pelo roteamento *fuzzy*, em comparação ao roteamento convencional. Por exemplo, para $k = 5$, foi obtida uma taxa de bloqueio de 6,05%, pelo algoritmo convencional, enquanto a obtida pelo algoritmo *fuzzy* foi de 3,50%. Nesse caso, portanto, a probabilidade de bloqueio da política de roteamento *fuzzy* foi 42,15% menor.

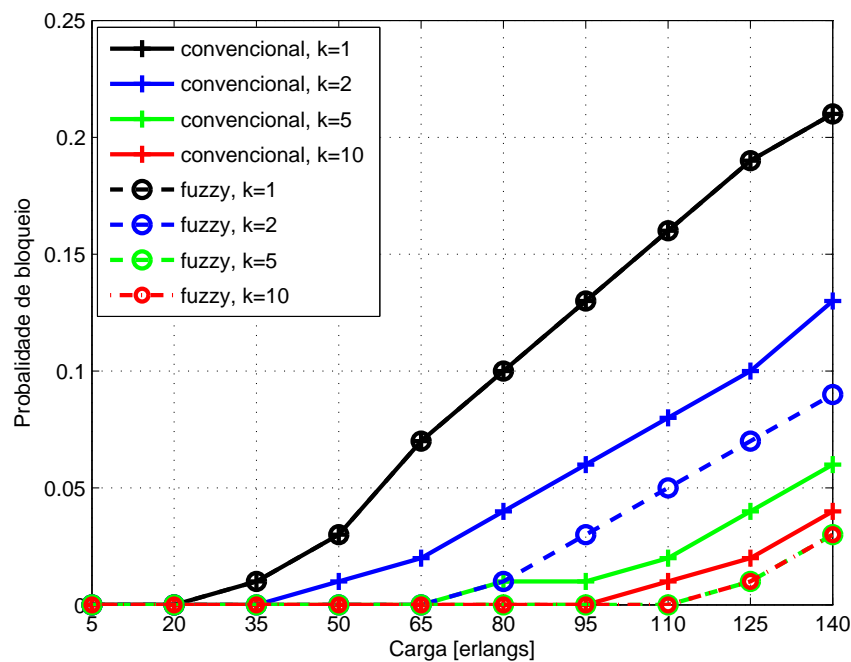


Figura 22: Probabilidade de bloqueio na rede regular de 16 nós - até 20%.

A curva completa de probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para os dois métodos de roteamento é mostrada na figura 23. A partir de um certo valor de carga, correspondente a uma taxa de bloqueio de aproximadamente 55%, deixa de ser interessante considerar rotas alternativas e também não se observam diferenças significativas entre o roteamento convencional e o *fuzzy*.

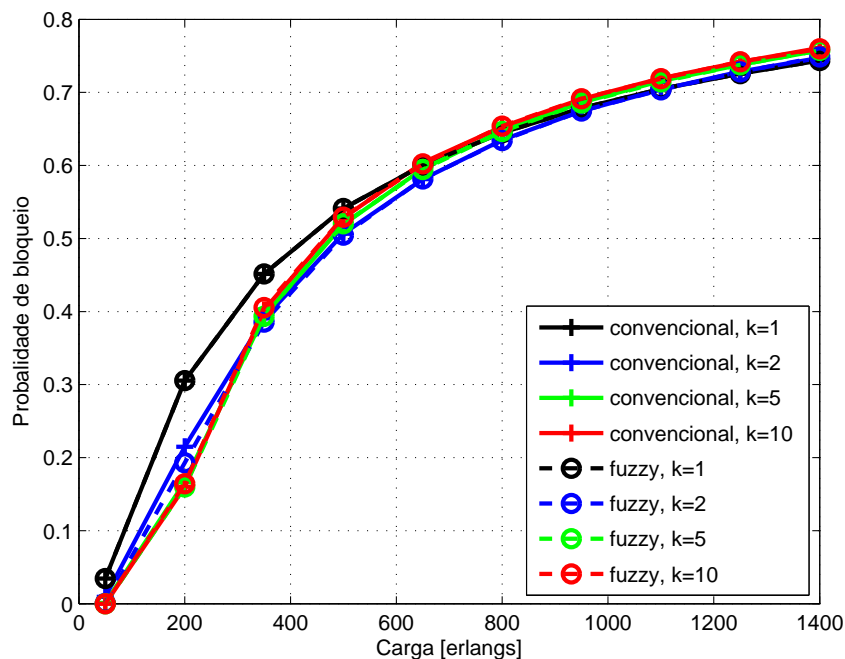


Figura 23: Probabilidade de bloqueio na rede regular de 16 nós - curva completa.

A figura 24 mostra a distribuição das requisições na rede regular de 16 nós, quando $k = 5$, e a carga da rede é fixada em 140 erlangs. Nessa situação, a política de roteamento *fuzzy* apresenta uma probabilidade de bloqueio inferior, como pode ser visto na coluna *Bloqueio* do gráfico. Isso se reflete no aumento das requisições aceitas, como se vê nas outras duas colunas do mesmo gráfico. Entretanto, este aumento não é proporcional: na coluna *Rota mínima*, o roteamento *fuzzy* apresenta uma taxa de aceitação apenas 1,87% maior que a obtida pelo roteamento convencional. Já no caso da coluna *Outras rotas*, é muito mais significativo este aumento: 52,90%.

Ainda deve-se observar a disparidade no tamanho das colunas *Rota mínima* e *Outras rotas*, indicando o uso preferencial de rotas mínimas no atendimento das requisições de conexão, pelas duas políticas de roteamento. No caso do roteamento *fuzzy*, dentre as requisições aceitas, 97,54% usaram rotas mínimas, enquanto no roteamento convencional, este número chega a 98,35%.

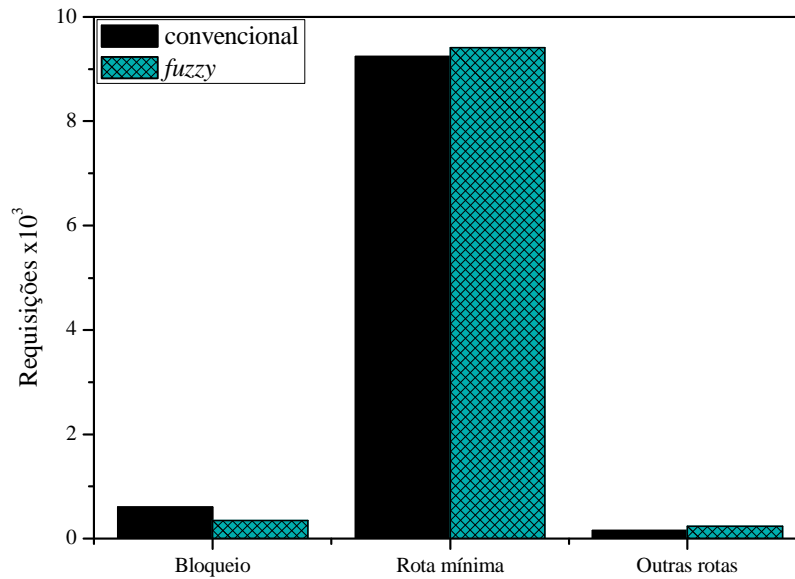


Figura 24: Distribuição das requisições para a rede regular de 16 nós, com $k = 5$.

Nas simulações realizadas com a rede de 16 nós, ocorreram rotas com 1, 2, 3 e 4 enlaces. De acordo com a notação introduzida no início deste capítulo, o conjunto M das requisições de conexão é dado por $M = M_1 \cup M_2 \cup M_3 \cup M_4$, onde M_i , $i = 1, 2, 3, 4$ representa a classe das requisições com i enlaces na rota mínima. A porcentagem de requisições bloqueadas para cada uma destas classes é apresentada na figura 25, simultaneamente para as duas políticas de roteamento.

A porcentagem de bloqueio obtida pelo roteamento *fuzzy* foi menor em todas as classes. Entretanto, convém notar que isso não é apenas um reflexo direto do resultado mostrado na coluna *Bloqueio* da figura 24. A princípio, uma taxa menor de bloqueio poderia ser consequência de uma taxa maior de aceitação em alguma classe específica.

Fica claro, na figura 25, que a rede tem maior facilidade em atender as requisições com menos enlaces na rota mínima. Isto é, quanto menor o índice i , menor é a taxa de bloqueio da classe M_i . Das 10 mil requisições de conexão geradas em cada simulação, em média 2679 poderiam ser atendidas com apenas 1 enlace. Dessas, 20 foram bloqueadas pelo algoritmo convencional, e apenas 8 foram bloqueadas pelo algoritmo de roteamento *fuzzy*. Além disso, das 658 requisições com 4 enlaces na rota mínima, 41,49% foram bloqueadas pelo método de roteamento convencional, e 24,16% foram bloqueadas no roteamento *fuzzy*.

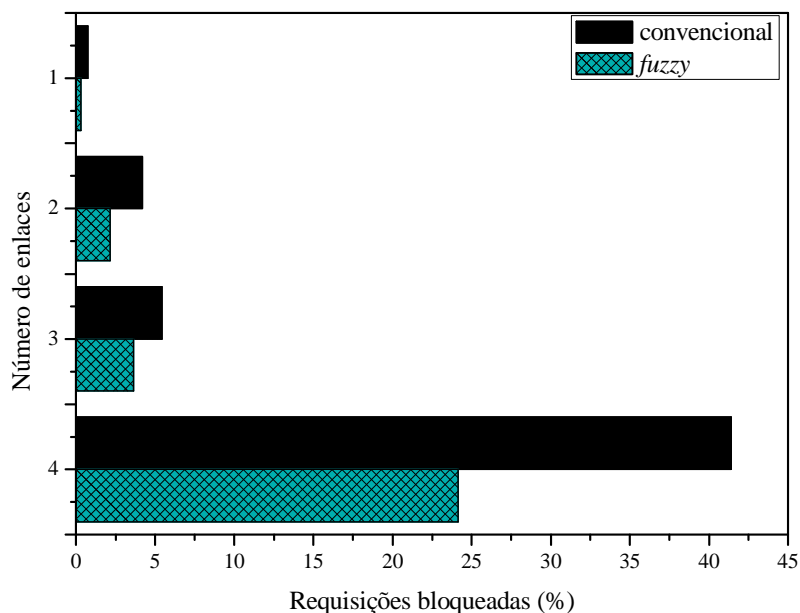


Figura 25: Distribuição das requisições bloqueadas para a rede regular de 16 nós, com $k = 5$.

5.2 Rede em malha irregular

A figura 26 mostra uma rede em malha irregular com 14 nós e 20 enlaces bidirecionais. Para essa rede, foram realizados testes sob as mesmas condições. Considerando que a taxa limite de 20% de bloqueio foi obtida com uma carga de 95 erlangs, a probabilidade de bloqueio foi analisada no intervalo $[0, 95]$ erlangs, e o valor extremo superior deste intervalo, com $k = 5$, foi utilizado para avaliar o uso das rotas pelos dois algoritmos de roteamento.

A probabilidade de bloqueio em função da carga da rede, para os algoritmos de roteamento convencional e *fuzzy*, é mostrada na figura 27. Em ambos os casos, nota-se que a probabilidade de bloqueio diminui consideravelmente (aproximadamente 4%) quando o número de rotas alternativas aumenta de $k = 1$ para $k = 2$. Porém, as curvas relativas a $k = 2$, $k = 5$ e $k = 10$ são muito próximas umas das outras. Nessa situação, portanto, não faz muita diferença oferecer mais rotas alternativas a nenhum dos dois algoritmos de roteamento.

Também se verifica, como esperado, que as versões convencional e *fuzzy* apresentam valores idênticos de probabilidade de bloqueio quando $k = 1$. Nesta rede, porém, nos casos $k = 2, 5$ e 10 percebe-se que não há variação significativa entre as duas políticas de roteamento.

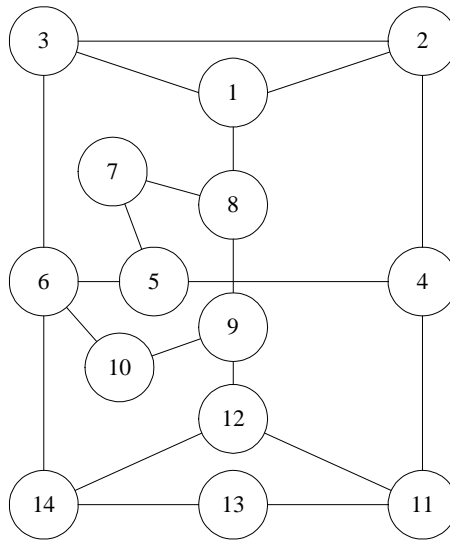


Figura 26: Rede de 14 nós e 20 enlaces bidirecionais.

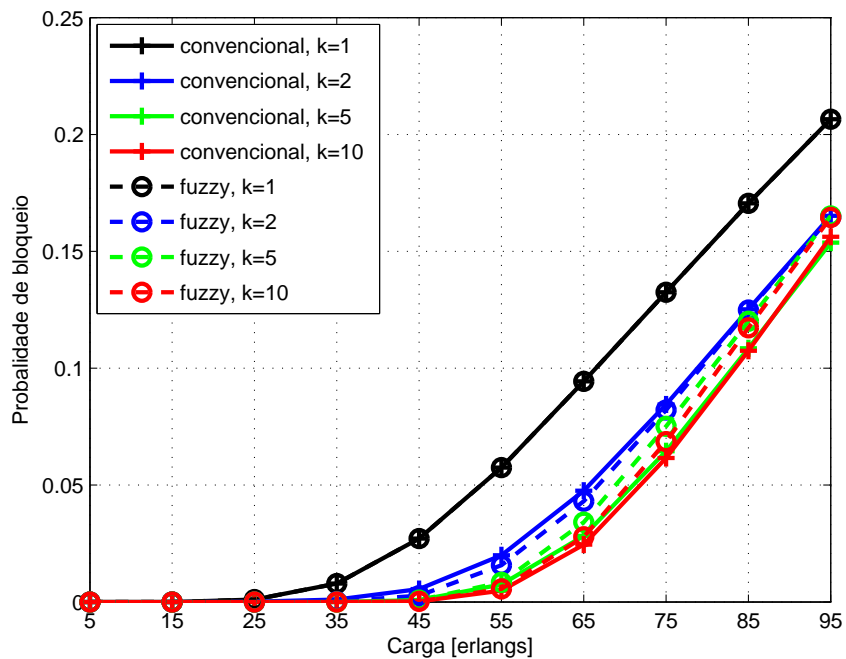


Figura 27: Probabilidade de bloqueio na rede irregular de 14 nós - até 20%.

Na curva completa de probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para os métodos de roteamento convencional e *fuzzy*, mostrada na figura 28, não é possível identificar diferenças significativas no comportamento das duas redes com relação ao aumento do número de rotas alternativas ou aos métodos de roteamento considerados.

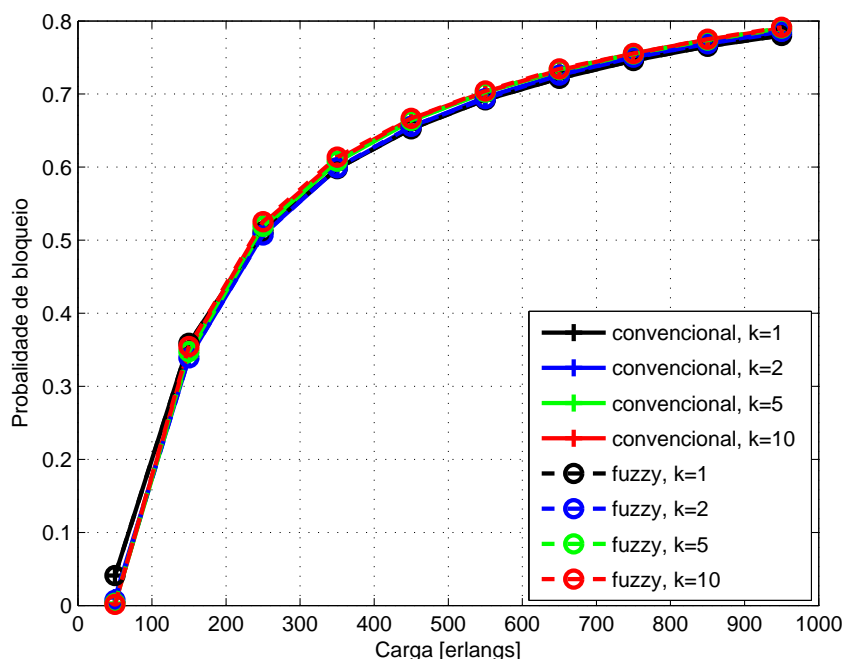


Figura 28: Probabilidade de bloqueio na rede irregular de 14 nós - curva completa.

A figura 29 mostra a distribuição de requisições quando $k = 5$ e a carga na rede atinge 95 erlangs. Na coluna *Bloqueio* do gráfico, observam-se valores próximos de probabilidade de bloqueio para as duas políticas de roteamento: 15,37%, no método convencional, e 16,51%, no roteamento *fuzzy*. Porém, nessa situação, a taxa de bloqueio obtida pelo roteamento *fuzzy* é 7,42% maior que a obtida pelo roteamento convencional.

Tendo em vista o resultado correspondente para a rede de 16 nós, visto na figura 24, poderia-se esperar que a taxa de bloqueio maior no caso *fuzzy* levasse a uma taxa de aceitação menor nas colunas *Rota mínima* e *Outras rotas*, da figura 29. Mas isso não se verifica. Ocorre uma redução de 13,61% na taxa de aceitação de requisições que usam rotas mínimas. Em contrapartida, a taxa de aceitação de requisições por outras rotas é 68% maior no caso *fuzzy*.

Nesta rede, há uma distribuição maior das requisições aceitas nas colunas *Rota mínima* e *Outras rotas* do gráfico, e não uma predominância de requisições aceitas usando rotas mínimas, como no resultado correspondente para a rede de 16 nós apresentado na figura 24.

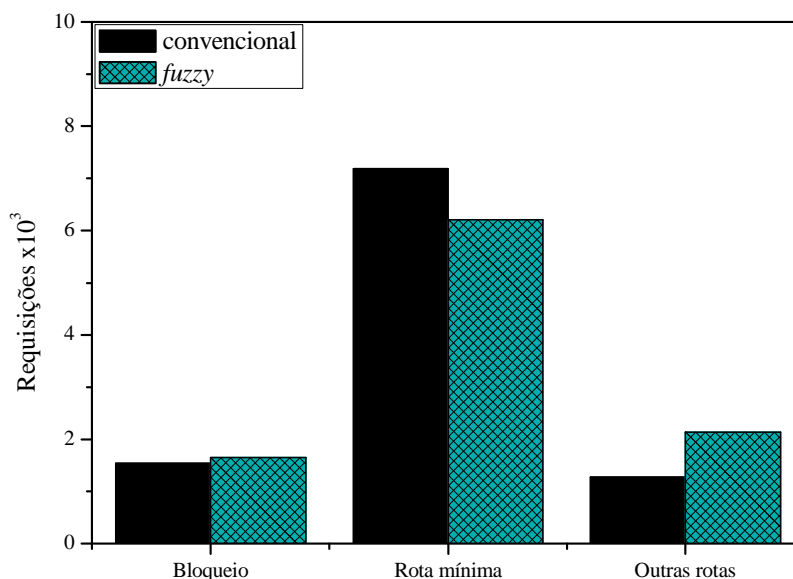


Figura 29: Distribuição das requisições para a rede irregular de 14 nós, com $k = 5$.

Nas simulações executadas com a rede de 14 nós, também ocorreram apenas rotas com 1, 2, 3 e 4 enlaces. Neste caso, temos então: $M = M_1 \cup M_2 \cup M_3 \cup M_4$, onde M_i , $i = 1, 2, 3, 4$ representa a classe das requisições com i enlaces na rota mínima. A porcentagem de requisições bloqueadas para cada classe é apresentada na figura 30 simultaneamente para as políticas de roteamento convencional e *fuzzy*.

Desta vez, a porcentagem de bloqueio obtida pelo roteamento *fuzzy* foi maior em todas as classes. Ainda deve-se notar que isso não é apenas uma consequência direta do resultado mostrado na coluna *Bloqueio* da figura 29.

Esta rede também tem maior facilidade em atender as requisições com menos enlaces na rota mínima, como se vê na figura 30. Das 10 mil requisições de conexão geradas em cada simulação, em média 2212 poderiam ser atendidas com apenas 1 enlace. Dessas, 67 foram bloqueadas pelo algoritmo convencional e 68 foram bloqueadas pelo algoritmo de roteamento *fuzzy*. Além disso, das 326 requisições com 4 enlaces na rota mínima, 34,05% foram bloqueadas pelo método de roteamento convencional, e 37,73% foram bloqueadas no roteamento *fuzzy*.

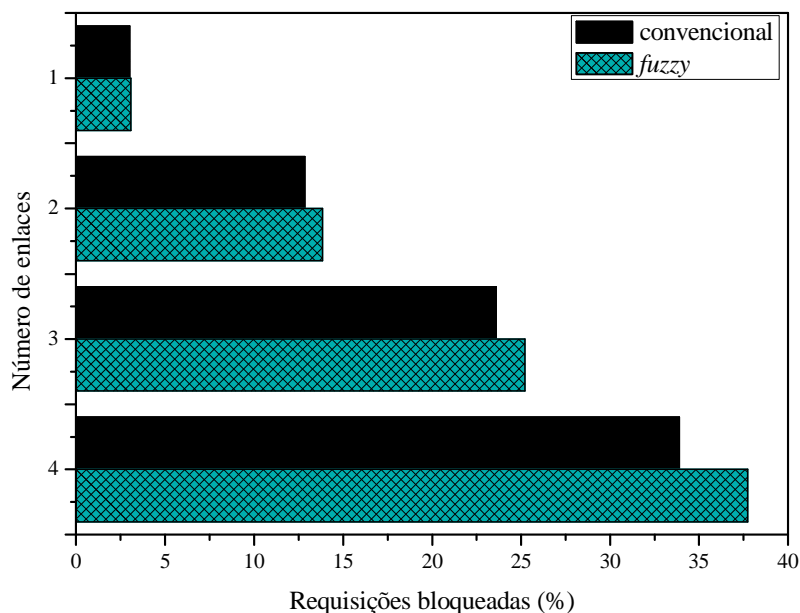


Figura 30: Distribuição das requisições bloqueadas para a rede irregular de 14 nós, com $k = 5$.

5.3 Análise dos resultados

Comparando as figuras 22 e 27, nota-se que a rede regular de 16 nós é mais sensível à diminuição da probabilidade de bloqueio com o aumento do número de rotas alternativas consideradas. Além disso, a diferença na probabilidade de bloqueio obtida pelos dois algoritmos de roteamento também é mais evidente na rede de 16 nós que na de 14 nós.

Na rede de 16 nós, a taxa de bloqueio obtida pelo roteamento *fuzzy* nunca é maior que a obtida pelo roteamento convencional. No caso da rede irregular de 14 nós, em algumas situações, o roteamento *fuzzy* apresenta melhores resultados de bloqueio que o roteamento convencional, e em outras, não.

A figura 24 mostra que na rede de 16 nós é predominante o uso de rotas mínimas nas duas políticas de roteamento. Já na figura 29, constata-se que na rede de 14 nós há uma maior distribuição das requisições de conexão e um aumento acentuado na aceitação de outras rotas além das mínimas pelo roteamento *fuzzy*, ainda que na mesma situação este método tenha apresentado uma taxa de bloqueio mais elevada.

Nas duas redes analisadas, observa-se que é maior a taxa de bloqueio das requisições que

necessitam de mais enlaces na rota mínima. Isso pode ser visto na figura 25, para a rede de 16 nós, e na figura 30, para a rede de 14 nós.

As diferenças constatadas no comportamento das redes analisadas foram atribuídas especialmente às diferenças na topologia das duas redes. Na rede regular de 16 nós, é frequente o empate do número de enlaces nas rotas alternativas, porém, o mesmo não ocorre na rede de 14 nós analisada, cuja topologia é irregular. O empate do número de enlaces nas rotas alternativas é uma característica que influencia nos resultados de probabilidade de bloqueio e uso das rotas, pois o empate oferece mais possibilidades para o SBRF atuar, decidindo a rota com mais critério que a política de roteamento convencional. Isso fica claro revendo-se as estratégias de roteamento utilizadas.

A versão convencional do algoritmo de roteamento sempre dá prioridade à rota com o menor número de enlaces, dentre as rotas disponíveis. E quando há mais de uma rota com o mesmo número de enlaces, conforme explicado na seção 4.1, o algoritmo convencional faz uma escolha arbitrária.

Na versão *fuzzy*, como são combinados dois critérios, nem sempre é escolhida uma rota mínima. O algoritmo pode preferir, em determinadas situações, uma rota que possui um enlace a mais, se ela tiver no momento muitos comprimentos de onda disponíveis. Havendo empate do número de enlaces em todas as rotas alternativas, será escolhida uma rota mínima, porém, menos congestionada.

5.4 Questões adicionais

Esta seção traz alguns comentários sobre outras simulações realizadas no decorrer do trabalho, cujos resultados não foram apresentados diretamente no texto, porém, influenciaram: as escolhas feitas para o sistema *fuzzy*, as métricas analisadas e algumas conclusões apresentadas. Diversas simulações foram realizadas com o intuito de identificar se algum dos dois métodos de roteamento, convencional e *fuzzy*, se destacava em alguma condição ou métrica particular, e outras foram feitas com o objetivo de analisar aspectos relacionados ao roteamento, independentemente do método.

5.4.1 Critério para a construção da tabela de roteamento

Os algoritmos de roteamento convencional e *fuzzy* recebem como parâmetro de entrada uma tabela de roteamento formada pelas k rotas de menor custo interligando cada par origem-

destino da rede, sendo adotado como critério de custo o número de enlaces das rotas. Com isso, quaisquer que sejam os parâmetros usados no sistema *fuzzy*, o número de enlaces já foi levado em consideração. Como é inevitável o uso de algum parâmetro inicial para a construção da tabela de roteamento, pode surgir a seguinte questão: há algum parâmetro mais apropriado para o pré-processamento desta tabela, no caso do roteamento *fuzzy*?

Sendo o custo da rota dado pelo somatório do custo dos enlaces que a compõem, foram consideradas as seguintes opções para o custo dos enlaces: zero, valor aleatório entre 0 e 1, e o atraso de propagação no enlace.

De fato, nesses casos, foram obtidos resultados melhores de probabilidade de bloqueio pelo roteamento *fuzzy*, em comparação ao roteamento convencional. Entretanto, para possibilitar uma comparação menos injusta entre os dois métodos de roteamento, foi mantido nas simulações o critério de número de enlaces.

5.4.2 Variação dos critérios para escolha da rota no sistema *fuzzy*

Os critérios do roteamento *fuzzy* foram adotados após a análise de uma série de simulações realizadas com sistemas *fuzzy* implementados, combinando dois a dois os seguintes critérios: número de enlaces, ocupação das rotas, atraso de propagação e duração das requisições de conexão.

5.4.3 Variação dos parâmetros do SBRF

Fixados os critérios de número de enlaces e ocupação das rotas, os resultados do roteamento *fuzzy* podem ser melhorados alterando-se os parâmetros do SBRF? Foram realizados diversos testes variando-se os tipos e os limites das funções de pertinência, e também foi implementado um SBRF com 25 regras. Mas as pequenas diferenças nos resultados não justificaram o uso de funções de pertinência mais complexas ou de um sistema computacionalmente mais caro.

5.4.4 Variação das estatísticas de geração das requisições de conexão

Foram realizados testes com as distribuições estatísticas de Pareto e Pareto truncado, para a duração das requisições, no lugar da distribuição exponencial tradicionalmente usada. Entretanto, as políticas de roteamento convencional e *fuzzy* apresentaram comportamento semelhante com relação à probabilidade de bloqueio para cada uma dessas distribuições.

5.4.5 Uso total dos enlaces

Outra métrica utilizada para comparar os métodos de roteamento convencional e *fuzzy* foi a distribuição de frequência do uso dos enlaces na rede. O uso total do enlace é dado pela quantidade de vezes que ele participa de uma rota que atende uma requisição de conexão, ao longo de toda a simulação. Foram feitos testes com o objetivo de verificar se determinados enlaces ficam sobrecarregados ou ociosos com o uso de algum dos métodos de roteamento. Calculados a média μ do uso de todos os enlaces da rede e o desvio padrão σ , foi observado que a quantidade de enlaces no intervalo $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ é muito próxima para as duas políticas de roteamento.

5.4.6 Probabilidade de bloqueio para rotas com muitos enlaces

A probabilidade de uma rota estar disponível para atender uma requisição de conexão depende da probabilidade de haver um mesmo comprimento de onda disponível em cada enlace da rota. Assim, é esperado que a rede tenha mais dificuldade em atender requisições de conexão que necessitem de uma grande quantidade de enlaces e, portanto, é coerente o comportamento observado nas figuras 25 e 30, em que a porcentagem de requisições bloqueadas aumenta com o número de enlaces na rota mínima.

Contudo, a generalização destes resultados levaria à conclusão de que as requisições de conexão que usam um número muito grande de enlaces na rota mínima seriam quase sempre bloqueadas, e isso não ocorre. Por exemplo, foi simulada uma rede em anel com 16 nós e oito comprimentos de onda por enlace, com $k = 2$ e as mesmas condições de carga descritas no início deste capítulo. Observou-se que apenas 38,58% das requisições com 8 enlaces na rota mínima foram bloqueadas. E esse número é compatível com os valores obtidos nas outras redes simuladas, para requisições com 4 enlaces na rota mínima.

6 *Conclusões e trabalhos futuros*

Neste trabalho, foi implementado um algoritmo de roteamento para redes ópticas sem conversores de comprimento de onda, utilizando um sistema baseado em regras *fuzzy*. A decisão da rota é tomada levando-se em consideração dois fatores: o número de enlaces das rotas candidatas e a disponibilidade de comprimentos de onda contínuos em cada uma delas.

Um simulador de eventos discretos para redes ópticas foi utilizado para analisar o desempenho de duas redes: uma com topologia em malha regular, com 16 nós e 32 enlaces; e outra em malha irregular com 14 nós e 20 enlaces. Em ambas, os enlaces são bidirecionais, e cada um permite a propagação de 8 comprimentos de onda. A demanda de tráfego foi considerada uniforme em todas as simulações.

Para cada rede, foram apresentados resultados de probabilidade de bloqueio *versus* carga, tanto para o roteamento estático, fixo e fixo alternativo, quanto para o roteamento *fuzzy*. Foi avaliado o efeito de aumentar o número de caminhos possíveis nos dois algoritmos. Também foi analisada a distribuição de requisições de conexão na rede.

Na rede regular de 16 nós, ocorreu uma diminuição da probabilidade de bloqueio com o aumento do número de rotas alternativas consideradas e com o uso do roteamento *fuzzy*. Além disso, foi observada predominância no uso de rotas mínimas no atendimento das requisições.

Na rede irregular de 14 nós, aumentando-se o número de rotas alternativas consideradas, ou alterando-se as políticas de roteamento empregadas, houve pouca variação na probabilidade de bloqueio. Porém, o roteamento *fuzzy* apresentou desempenho pior que o roteamento convencional em algumas situações, e ocorreu uma utilização maior de outras rotas além das mínimas.

O desempenho do algoritmo de roteamento *fuzzy* foi melhor na rede regular de 16 nós possivelmente em função do empate frequente do número de enlaces nas rotas alternativas. Justifica-se esse fato pois, no caso de empate, o SBRF pode atuar na decisão da rota com mais critério que a política de roteamento convencional.

Dentre os resultados apresentados, ocorreu uma situação em que a utilização de um critério

adicional na escolha de uma rota por um sistema *fuzzy* leva a uma probabilidade de bloqueio mais alta que a obtida com o roteamento convencional, que considera apenas o número de enlaces das rotas. Esse fato não é trivial e indica que um critério tem maior relevância que outro no processo de decisão da rota.

Convém ainda lembrar que os resultados mostrados neste trabalho foram obtidos com um mesmo SBRF para as duas redes, ou seja, o sistema *fuzzy* foi elaborado para ser genérico, e não foram feitos ajustes finos com a intenção de obter um melhor resultado para uma situação particular, embora isso possa ser feito.

De fato, é possível elaborar um sistema *fuzzy* de modo que os resultados obtidos por ele nunca sejam piores que os obtidos pelo roteamento convencional, bastando, para isso, atribuir pesos diferentes aos critérios adotados para a escolha da rota. Mas não existe a garantia de melhores resultados em situação alguma.

Fixados os parâmetros do SBRF, como neste caso as variáveis de entrada do sistema são discretas, os resultados das operações realizadas podem ser sintetizados em uma tabela e apenas consultados a cada requisição de conexão. A tabela só precisaria ser refeita em caso de alteração na topologia da rede ou no número de comprimentos de onda por enlace. Assim, a utilização de um SBRF para escolha das rotas é viável em termos de custo computacional.

Além dos resultados apresentados, foram feitos diversos testes, com estas e outras redes. Uma conclusão obtida com eles é que a utilização de um SBRF para o roteamento pode melhorar significativamente o desempenho de determinadas redes. Porém, não foi possível identificar claramente a característica da rede responsável por isso, e esta pesquisa deve ser continuada em trabalhos futuros. Uma possibilidade é o empate frequente do número de enlaces nas rotas alternativas, mas esse aspecto ainda deve ser mais bem investigado.

Ferramentas que utilizam lógica *fuzzy* ainda não foram suficientemente exploradas na área de telecomunicações. Esse é um campo em aberto e ainda pode trazer bons resultados, a exemplo do que ocorre na área de controle automático.

Nesta dissertação, o enfoque foi dado ao subproblema RWA, mais especificamente ao problema de roteamento. Como continuação deste trabalho, pretende-se fazer um levantamento das características importantes no projeto de redes ópticas, bem como dos principais parâmetros de desempenho de tais redes. Feito isso, será analisada a viabilidade da implementação de um sistema *fuzzy* para o projeto completo de redes ópticas, isto é, para a resolução simultânea dos subproblemas VTD e RWA.

Publicações

- M. H. M. Paiva; C. P. Maioli; E. S. Oliveira; M. E. V. Segatto: Aplicação de sistemas baseados em regras *fuzzy* para o roteamento em redes ópticas. In: *Anais do MOMAG 2008: XIII Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e VIII Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*. Florianópolis, 2008.
- M. H. M. Paiva; M. M. O. Silva; F. R. de Souza; G. Lavagnoli; M. O. Lima; C. R. L. Francês; J. W. Costa; R. T. R. Almeida; E. S. Oliveira; M. E. V. Segatto: Análise de redes ópticas em anéis hierárquicos. In: *Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*. Recife, 2007.
- E. S. Oliveira; M. E. V. Segatto; M. M. O. Silva; F. R. de Souza; M. H. M. Paiva; G. Lavagnoli; M. O. Lima; R. T. R. Almeida; A. S. Garcia: On solving HSHR networks. In: *Proceedings of ConfTele 2007: 6th Conference on Telecommunications*. Peniche - Portugal, 2007.

Referências

ABRAMOVITCH, D. Y.; BUSHNELL, L. G. Report on the fuzzy versus conventional control debate. *IEEE Control Systems Magazine*, v. 19, n. 3, p. 88–91, 1999.

ALENCAR-FILHO, E. de. *Iniciação à lógica matemática*. 18. ed. São Paulo: Editora Nobel, 2000.

ALMEIDA, R. T. R. et al. Design of virtual topologies for large optical networks through an efficient MILP formulation. *Optical Switching and Networking*, v. 3, p. 2–10, 2006.

CAMPELO, D. R. S. *Modelos analíticos para probabilidades de bloqueio em redes de caminhos ópticos com topologias lineares*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

CORMEN, T. H. et al. *Algoritmos: teoria e prática; tradução da segunda edição americana*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2002.

COX, E. Fuzzy fundamentals. *IEEE Spectrum*, v. 29, n. 10, p. 58–61, 1992.

FERNANDEZ, M. P.; PEDROZA, A. C. P.; REZENDE, J. F. Implementação de políticas de gerenciamento através de lógica fuzzy visando melhoria da qualidade de serviço (QoS). In: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*. Natal: [s.n.], 2003. p. 185–200.

HALMOS, P. R. *Teoria ingênua dos conjuntos*. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2001.

HERNANDES, F. et al. The shortest path problem on networks with fuzzy parameters. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 158, n. 14, p. 1561–1570, 2007.

HINES, W. W. et al. *Probabilidade e estatística na engenharia*. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

HWANG, I.-S.; LEE, S.-N.; CHANG, I.-C. Performance assessment of fuzzy logic control routing algorithm with different wavelength assignments in DWDM networks. *Journal of Information Science and Engineering*, v. 22, n. 2, p. 461–473, 2006.

JAFELICE, R. S. M.; BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C. *Teoria dos conjuntos fuzzy com aplicações*. São Paulo: Editora Plêiade, 2005.

LEA, D. P. *Soft computing approaches to routing and wavelength assignment in wavelength-routed optical networks*. Tese (Ph.D.) — Graduate Faculty, North Carolina State University, Raleigh, 2004.

- MAIOLI, C. P. *Dimensionamento de redes ópticas dinâmicas para Data-Grid Services*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.
- MURTHY, C. S. R.; GURUSAMY, M. *WDM optical networks: concepts, design, and algorithms*. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- OKADA, S. Fuzzy shortest path problems incorporating interactivity among paths. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 142, n. 3, p. 335–357, 2004.
- PAIVA, M. H. M. et al. Análise de redes ópticas em anéis hierárquicos. In: *Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*. Recife: [s.n.], 2007.
- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. *Optical networks: a practical perspective*. 2. ed. London: Academic Press, 2001.
- RAZAVI, R. et al. Fuzzy logic packet scheduling approach for QoS provision of delay-constrained traffic in synchronous optical packet switched networks. *Journal of Optical Networking*, OSA, v. 7, n. 2, p. 119–131, 2008.
- RESENDE, R. A. *Qualidade de serviço em rede IP utilizando lógica fuzzy*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- SANDRI, S.; CORREA, C. Lógica nebulosa. In: *Anais da V Escola de Redes Neurais*. São José dos Campos: [s.n.], 1999. p. c073–c090.
- SARDAR, A. R. et al. Softcomputing tool based intelligent routing and wavelength assignment in all optical network. In: *Proceedings of Photonics*. Kochi: [s.n.], 2004.
- WEN, B. et al. Optical wavelength division multiplexing (WDM) network simulator (OWns): Architecture and performance studies. *SPIE Optical Networks Magazine Special Issue on Simulation, CAD, and Measurement of Optical Networks*, 2001.
- YEN, J. Y. Finding the lengths of all shortest paths in N-node nonnegative-distance complete networks using $\frac{1}{2} N^3$ additions and N^3 comparisons. *Journal of the ACM*, ACM, New York, v. 19, n. 3, p. 423–424, 1972.
- YING, H. *Fuzzy control and modeling: analytical foundations and applications*. New York: IEEE Press, 2000.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338–353, 1965.
- ZADEH, L. A. From computing with numbers to computing with words - from manipulation of measurements to manipulation of perceptions. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, v. 46, n. 1, p. 105–119, 1999.
- ZADEH, L. A. Is there a need for fuzzy logic? *Information Sciences*, v. 178, n. 13, p. 2751–2779, 2008.
- ZANG, H.; JUE, J.; MUKHERJEE, B. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks. *Optical Networks Magazine*, v. 1, n. 1, p. 47–60, 2000.